ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS EM BETÃO LEVE

Diego Júnior de Souza

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

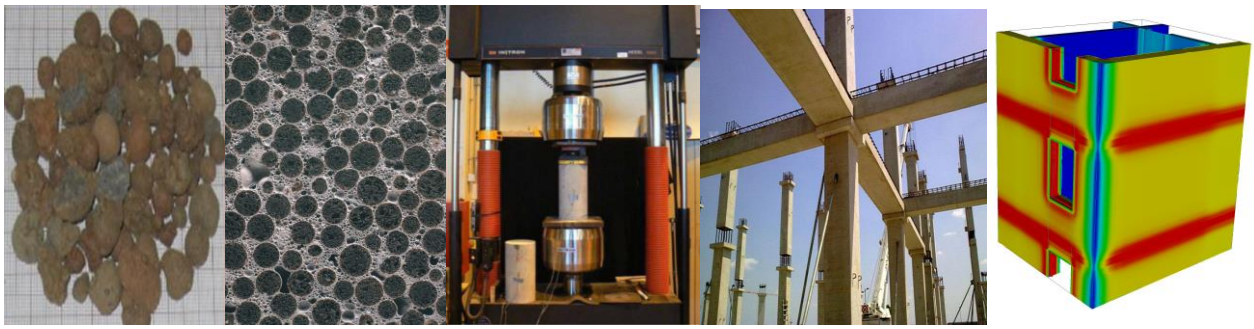
Engenharia Civil

Orientadores: Prof. José Alexandre de Brito Aleixo Bogas
Prof.ª Maria da Glória de Almeida Gomes

Júri

Presidente: Prof.ª Ana Paula Participo Teixeira Ferreira Pinto França de Santana
Vogais: Prof.ª Maria da Glória de Almeida Gomes
Prof. Antonio Heleno Domingues Moret Rodrigues

Outubro de 2014



Análise do desempenho térmico da envolvente de edifícios em betão leve

Diego Júnior de Souza

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projecto FCT *EELWAC*

Durability and lifetime of more energy efficient structural lightweight aggregate concrete

Task 2 - Insulation performance of durable LWAC as a more energy efficient building solution

Projecto FCT PTDC/ECM-COM/1734/2012

União Europeia
FEDER

Governo da República Portuguesa

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR
Portugal

RESUMO

Os edifícios são responsáveis por uma grande parte dos consumos energéticos sendo por isso bastante importante aumentar a sua eficiência energética. Uma das estratégias para aumentar a eficiência energética dos edifícios prende-se com a melhoria da envolvente térmica dos edifícios. O presente estudo pretende analisar o desempenho térmico de edifícios com elementos estruturais em betão leve.

Este trabalho procura, numa primeira fase, caracterizar experimentalmente o comportamento mecânico e térmico de betões normais e betões leves.

Na campanha experimental, verificou-se que os betões leves comparativamente aos betões normais de composição semelhante, apresentaram menor massa volúmica e menor resistência à compressão e à tracção por compressão diametral. O betão leve por ser constituído por agregados de menor massa volúmica apresenta menor coeficiente de condutibilidade térmica, sendo uma solução com melhores características de isolamento térmico.

Para avaliar os benefícios térmicos na utilização de betões leves nos elementos estruturais da envolvente dos edifícios, foi realizado, numa segunda fase, um conjunto de simulações energéticas. Nestas simulações foram utilizados os resultados experimentais de condutibilidade térmica, de calor específico e de massa volúmica obtidos para 4 betões leves e 3 betões normais. Foi ainda avaliado o desempenho destes diferentes betões para 12 localidades com diferentes condições climáticas. Verificou-se que as necessidades de arrefecimento e aquecimento são, em geral, menores nos betões leves do que nos betões normais de composição semelhante. Ao comparar os betões leves com os betões normais de composição semelhante, verifica-se uma redução das trocas de calor através dos elementos estruturais da envolvente exterior.

Os betões leves estruturais permitem assim soluções construtivas com melhor comportamento térmico, no sentido que permitem minimizar as trocas de calor e reduzir o consumo energético necessário para garantir o conforto térmico pretendido.

Palavras-chaves: betão leve, simulação energética, trocas de calor, desempenho térmico.

ABSTRACT

The buildings are responsible for a great part of energy needs, being therefore very important increase its energy efficiency. One of the following strategies for increase the energy efficiency of buildings involves improving of the thermal envelope of buildings. The present study intends to analyze the thermal performance of buildings with structural elements in lightweight concrete.

This study, in the first stage, seeks to characterize experimentally the mechanical and thermal behavior of the normal and lightweight concrete.

This program, it was observed that the lightweight concretes compared with normal concretes of similar composition, have low density and show a reduction of the mechanical resistance (axial compression and traction by diametrical compression). The lightweight concrete made of lower density aggregates has a lower thermal conductivity coefficient, making it a better solution for thermal isolation.

To assess the thermal benefits in the use of lightweight concrete in structural elements of the building envelope, it was conducted, in the second stage, a data of energy simulations. On these simulations was used the experimental results of thermal conductivity, specific heat and density obtained for 4 lightweight concrete and 3 normal concrete. It was evaluated the thermal performance theses different concrete for 12 locations with different climatic conditions.

It was verified that cooling and heating energy, in general, they are lower for lightweight concretes in relation with the normal concretes of similar composition. In comparing of heat exchanges between the normal and lightweight concretes of similar composition, the lightweight concretes showed a reduction of the heat exchanges through the structural elements of the building external envelope.

The structural lightweight concretes provide constructive solutions for improving thermal performance to minimize the heat exchanges and to save energy necessary to guarantee the intended comfort levels.

Keywords: lightweight concrete, energy simulation of buildings, heat exchanges, thermal performance.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo contou com a contribuição e apoio de várias pessoas a quem desejo expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer o Profº. José Alexandre Bogas, que com o seu vasto conhecimento em betões leves estruturais e a sua capacidade de investigação, me orientou no desenvolvimento deste trabalho e á Profª. Maria Glória Gomes, co-orientadora deste estudo cuja experiência e amplos conhecimentos no domínio da térmica de edifícios tornaram possível a concretização desta dissertação. Não posso deixar de referir e agradecer a disponibilidade, empenho, dedicação, paciência e bastante tempo perdido na explicação exaustiva do programa e de todos os ensinamentos.

Sendo este trabalho uma etapa importante no meu percurso académico e pessoal, não poderia terminar sem agradecer a minha família, amigos e a todos aqueles que de uma forma ou de outra ajudaram a sua concretização, com especial destaque a minha mãe Maria Souza. A todos o meu obrigado.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1

1.2. OBJECTIVOS 2

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 3

2. ESTADO DA ARTE 5

2.1. BETÕES LEVES 5

2.1.1. Definição e enquadramento 5

2.1.2. Normalização 6

2.1.3. Aplicações 7

2.1.4. Principais propriedades dos agregados leves 11

2.1.5. Principais propriedades dos betões estruturais produzidos com agregados leves 13

2.2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS EDIFÍCIOS 19

2.2.1. Processos de transmissão de calor 20

2.2.2. Coeficiente de transmissão térmica 23

2.2.3 Ganhos solares e factor solar 24

2.2.4. Principais factores que afetam o comportamento térmico dos edifícios 25

2.2.5. Regulamentação atual 27

2.2.6. Programas de simulação energética 29

2.3. COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS COM SOLUÇÕES EM BETÃO LEVE 29

2.3.1. Considerações gerais 29

2.3.2. Aplicação de betão leve em elementos não estruturais 30

2.3.3. Aplicação de betão leve em elementos estruturais 31

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL 33

3.1. INTRODUÇÃO 33

3.2. PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL 34

3.3. MATERIAIS 34

3.3.1. Ensaios de caracterização dos agregados 35

3.3.1.1. Análise granulométrica 35

3.3.1.1.1. Objectivo e norma do ensaio 35
3.3.1.1.2. Procedimento de ensaio 35
3.3.1.1.3. Resultados do ensaio 36
3.3.1.2. Massa volúmica, absorção de água e teor de Humidade 39
3.3.1.2.1. Objectivo e norma do ensaio 39
3.3.1.2.2. Procedimento de ensaio para agregados finos 39
3.3.1.2.3. Procedimento de ensaio para agregados grossos 39
3.3.1.2.4. Resultados dos ensaios 40
3.3.1.2.5. Teor de Humidade 41
3.3.1.2.6. Apresentação e discussão de resultados 41
3.4. FORMULAÇÃO DOS BETÕES 43
3.4.1 Introdução 43
3.4.2. Composição dos betões 43
3.4.2.1. Dosagem de água de amassadura 43
3.4.2.2 Volume total de areia 44
3.4.2.3 Composições utilizadas 44
3.4.3. Betão de referência 44
3.4.4 Definição das misturas 46
3.5. PRODUÇÃO DOS BETÕES 47
3.5.1. Correcção das misturas 47
3.5.2. Mistura 47
3.5.3.Moldagem, compactação e cura 47
3.6. ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO 48
3.6.1. Ensaio de abaixamento 48
3.6.1.1. Objectivo e norma do ensaio 48
3.6.1.2. Procedimento de ensaio 48
3.6.1.3. Resultados do ensaio 49
3.6.2. Massa volúmica 49
3.6.2.1. Objectivo e norma do ensaio 49
3.6.2.2. Procedimento de ensaio 49
3.6.2.3. Resultados do ensaio 50
3.7. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO 50

3.7.1. Resistência à compressão 50
3.7.1.1. Objectivo 50
3.7.1.2. Normas de ensaio 50
3.7.1.3. Aparelhos e utensílios 50
3.7.1.4. Procedimentos do ensaio 51
3.7.1.5. Resultados do ensaio 51
3.7.2. Resistência à tracção por compressão diametral 52
3.7.2.1. Objectivo 52
3.7.2.2. Norma de ensaio 52
3.7.2.3. Aparelhos e utensílios 52
3.7.2.4. Procedimento de ensaio 53
3.7.2.5. Resultados 53
3.7.3. Módulo de Elasticidade 54
3.7.3.1. Objectivo 54
3.7.3.2. Norma de ensaio 54
3.7.3.3. Aparelhos e utensílios 54
3.7.3.4. Procedimento de ensaio 54
3.7.3.5. Resultados 55
3.8. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA 56
3.8.1. Ensaio de avaliação da condutibilidade térmica 56
3.8.2. Procedimento de ensaio 56
3.8.3. Resultados do ensaio. 57
3.9. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS 57
3.9.1. Propriedades dos betões no estado fresco 57
3.9.2. Propriedades mecânicas dos betões no estado endurecido 58
3.9.2.1. Resistência à compressão 58
3.9.2.2. Eficiência estrutural 59
3.9.2.3. Resistência à tracção 60
3.9.2.3. Módulo de elasticidade 61
3.9.3. Propriedades térmicas dos betões no estado endurecido 61
4. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS EM BETÃO LEVE 65
4.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO 65

4.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO *ENERGY PLUS* 67
4.2.1. *Simulation Parameters* 69
4.2.2. *Location and Climate* 70
4.2.3. *Schedule* 71
4.2.4. Surface Constrution Elements 72
4.2.5*. Thermal Zones and Surfaces* 74
2.6. *Internal Gains* 78
4.2.7. *Zone Airflow* 78
4.2.7. *HVAC Templates* 79
4.2.8. *Output Reporting* 79
4.2.9. *Weather File* 80
4.3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS 80
4.3.1. Análise do consumo energético 80
4.4.2. Análise das trocas de calor 90
4.4.3. Coeficientes de transmissão térmica dos elementos estruturais e espessuras mínimas de isolamento térmico 101
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 103
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS 103
5.2. CONCLUSÕES GERAIS 104
5.3. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO 107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 109
ANEXO A – ANALÍSE GRANULOMÉTRICA
ANEXO B – COMPOSIÇÃO DOS BETÕES .....
ANEXO C – MASSA VOLÚMICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E TEOR DE HUMIDADE
ANEXO D – MASSA VOLÚMICA NO ESTADO ENDURECIDO
ANEXO E – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
ANEXO F – RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL
ANEXO G – MÓDULO DE ELASTICIDADE
ANEXO H – PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS BETÕES NO ESTADO ENDURECIDO
ANEXO I – PLANTA DO APARTAMENTO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diferentes tipos de betão leve (Bogas, 2011) 5
Figura 2.2 - Edifício Torre Picasso..... 8
Figura 2.3 - Ponte Nordhordland, Noruega..... 9
Figura 2.4 - Plataforma Hibernia (Bogas 2011) 10
Figura 2.5 - Curva de relação entre condutibilidade térmica e a massa volúmica (Clarke, 1993).....18
Figura 2.6 – Balanço térmico de edifícios na situação de Verão (Silva, 2006).....19
Figura 2.7 – Balanço térmico de edifícios na situação de Inverno (Silva, 2006).....20

Figura 3.1 - - Agitador de peneiros utilizado na análise granulométrica.....36
Figura 3. 2 - Curvas granulométricas dos agregados 37
Figura 3.3- Curva de evolução de absorção de água da areia leve 42
Figura 3. 4 - Curva de evolução de absorção de água da Leca.....42
Figura 3. 5 – Curva granulometria da brita composta.....45
Figura 3.6 - Equipamento para o ensaio de abaixamento.....49
Figura 3.7 - Tipos de abaixamento 49
Figura 3.8 - Prensa hidráulica de 4 colunas.....51
Figura 3.9 - Controlo da prensa hidráulica de 4 colunas.....51
Figura 3.10 - Esquema ilustrativo de um posicionador (NP EN 12390-6) 52
Figura 3.11- Posicionador 53
Figura 3.12 - Posicionador na prensa hidráulica de 4 colunas.....53
Figura 3. 13 - PC e data logger (à esquerda) e controlo da prensa hidráulica (à direita) 55
Figura 3. 14 - Prensa hidráulica com provete 55
Figura 3.15 – Exemplo de realização de um ensaio com o equipamento ISOMET 2114.....56
Figura 3.16 - Factores de eficiência estrutural para diferentes tipos de agregados e dosagem de cimento.....60
Figura 3. 17- Comparação dos resultados obtidos com outros estudos.....63

Figura 4.1 - Geometria da fracção autónoma utilizada como caso de estudo.....65
Figura 4.3 - Programa IDF-Editor 67
Figura 4.4 - Programa *EP-Launch*.....67
Figura 4.5 - Programa *SketchUp* com as barrar do *plug-in Open Studio* 68
Figura 4.6 – Grupo *Simulation Parameters*.....69
Figura 4.7 – Campos de entrada do *Run Period*.....71
Figura 4.8 – Objeto *Schedule*.....71

Figura 4.9 – Campos de entrada do *Material*.....73
Figura 4.10 – Constituição dos elementos construtivos no campo *Construction*.....74
Figura 4.11 – Geometria da fracção autónoma no *SketchUp* 75
Figura 4.12 – Campos de entrada de *Building Surface: Detailed*.....76
Figura 4.13 - Campos de entrada de *Window Property: Shading Control*.....77
Figura 4.14 – Campos de entrada do objeto *Fenestration Surface: Detailed* 77
Figura 4.15 – Preenchimento do campo *Light* no objeto *Internal Gain*.....78
Figura 4.16 - Preenchimento do objeto Ventilation: Design Flow Rate 78
Figura 4.17 - Objeto *HVAC Template Thermostat* 79
Figura 4.18 - Objeto HVAC Tempate Zone Ideal Loads Air System.....79
Figura 4.19 - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento de Portugal a) Lisboa no período de Inverno; b) Lisboa no período anual; c) Faro no período de Inverno; d) Faro no período anual; e) Porto no período de Inverno; f) Porto no período anual; g) Bragança no período de Inverno; h) Bragança no período anual.....81
Figura 4.20 - Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de Portugal a) Lisboa no período de Verão; b) Lisboa no período anual; c) Faro no período de Verão; d) Faro no período anual; e) Porto no período de Verão; f) Porto no período anual; g) Bragança no período de Verão; h) Bragança no período anual. 82
Figura 4. 21 - Percentagem de redução das necessidades energéticas de aquecimento entre o betão leve e normal de composição semelhante e entre BL 3 e BL 4.....83
Figura 4.22 - Percentagem de redução das necessidades energéticas de arrefecimento entre o betão leve e normal de composição semelhante. 84
Figura 4.23 - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento para as cidades europeias a) Berlim no período de Inverno; b) Berlim no período anual; c) Sofia no período de Inverno; d) Sofia no período anual; e) Copenhaga no período de Inverno; f) Copenhaga no período anual; g) Londres no período de Inverno; h) Londres no período anual. 85
Figura 4.24 - Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento para as cidades europeias a) Berlim no período de Verão; b) Berlim no período anual; c) Sofia no período de Verão; d) Sofia no período anual; e) Copenhaga no período de Verão; f) Copenhaga no período anual; g) Londres no período de Verão; h) Londres no período anual. 86
Figura 4.25 - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento para a)Hong Kong no período de Inverno; b) Hong Kong no período anual; e para as cidades do hemisfério Sul c) São Paulo no período de Inverno; d) São Paulo no período anual; e) Cidade do Cabo no período de Inverno; f) Cidade do Cabo no período anual; g) Camberra no período de Inverno; h) Camberra no período anual. 88
Figura 4.26 - Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento para a)Hong Kong no período de Verão; b) Hong Kong no período anual; e para as cidades do hemisfério Sul c)

São Paulo no período de Verão; d) São Paulo no período anual; e) Cidade do Cabo no período de Verão; f) Cidade do Cabo no período anual; g) Camberra no período de Verão; h) Camberra no período anual.....89
Figura 4.27 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Lisboa a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4. 91
Figura 4.28 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Copenhaga a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.....92
Figura 4.29 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Londres a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4. 93
Figura 4.30 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Hong Kong a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.....94
Figura 4.31 – Trocas de calor na estação de aquecimento de São Paulo a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.....95
Figura 4.32 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Lisboa a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4. 96
Figura 4.33 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Copenhaga a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.....98
Figura 4.34 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Londres a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4. 98
Figura 4.35 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Hong Kong a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d)

Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.....99
Figura 4.36 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de São Paulo a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.....100

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classe de massa volúmica do betão de agregados leves (NPEN 206-1 2005). 7

Quadro 3.1 - Massa mínima dos provetes de ensaio para realização da análise granulométrica 35
Quadro 3.2 – Análise granulométrica dos agregados 38
Quadro 3. 3 - Massas volúmicas, absorção e teor de água dos agregados.....41
Quadro 3. 4 - Dosagem de água consoante a relação a/c.....44
Quadro 3.5 - Dosagem dos constituintes dos betões 44
Quadro 3. 6 - Curva granulométrica da brita composta (bago de arroz e brita 1).....45
Quadro 3.7 - Composições dos betões 46
Quadro 3.8 - Massa dos constituintes dos betões por betonagem 46
Quadro 3.9 - Abaixamento e massa volúmica em estado fresco 57
Quadro 3. 10 - Resultados da massa volúmica seca e das propriedades mecânicas dos betões 58
Quadro 3. 11 – Redução percentual das propriedades mecânicas entre betões 58
Quadro 3. 12 - Classe de resistência dos betões leves 60
Quadro 3. 13 - Coeficientes de condutibilidade térmica.....61

Quadro 4. 1 – Esquema ilustrativo dos *inputs* e *outputs* das simulações.....68
Quadro 4.2 - Coeficientes de transmissão térmica dos elementos estruturais e espessura mínima de isolamento térmico.....101

ABREVIATURAS

AVAC - Sistema de climatização

BAN - Betão convencional com agregados de massa volúmica normal

BEAL - Betão Estrutural com agregados leves

BL 1 Betão com agregados grossos leves e areia natural, de relação água/cimento 0,60

BL 2 Betão com agregados grossos leves e areia natural, de relação água/cimento 0,45

BL 3 Betão com agregados grossos leves e areia natural, de relação água/cimento 0,35

BL 4 Betão com agregados grossos leves e areia leve de relação água/cimento 0,35

BN 1 Betão normal com relação água/cimento 0,60

BN 2 Betão normal com relação água/cimento 0,45

BN 3 Betão normal com relação água/cimento 0,35

GEE - Gases com efeito estufa

SP - Superplastificante

XPS -Poliestireno extrudido

SIMBOLOGIA

a/c - Relação água/cimento em massa [-]

a/l - Relação água/ligante em massa [-]

$\mathbf{C_p}$ - Capacidade térmica volumétrica [J/m^3C^{-1}]

$\mathbf{E_a}$ - Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]

$\mathbf{E_c}$ - Módulo de elasticidade em compressão [GPa]

$\mathbf{f_c}$ - Resistência à compressão [MPa]

$\mathbf{f_{cm}}$ - Resistência média à compressão [MPa]

$\mathbf{f_{ct}}$ - Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]

$\mathbf{f_{ctm}}$ - Resistência média à tracção por compressão diametral [MPa]

$\mathbf{g^{\perp}}$ - Factor solar do vidro [-]

GD - Graus-dia de aquecimento [ºC]

$\mathbf{G_{Vent}}$ - Fluxo de calor por ventilação [W]

$\mathbf{h_c}$ - Condutância térmica superficial por convecção [$W/m^{2o}C$]

$\mathbf{h_{se}}$ - Condutância térmica superficial exterior [$W/m^{2o}C$]

$\mathbf{h_{si}}$ - Condutância térmica superficial interior [$W/m^{2o}C$]

$\mathbf{k_p}$ - Condutância térmica do elemento [$W/m^{2o}C$]

$\mathbf{N_{ac}}$ - Necessidade de energia para a preparação de águas quentes sanitárias [W]

$\mathbf{N_{aquec}}$ - Necessidade energética de aquecimento [W]

$\mathbf{N_{arref}}$ - Necessidade energética de arrefecimento [W]

$\mathbf{N_{tc}}$ - Necessidades globais de energia primária [W]

Q - Fluxo de calor transferido entre o ambiente interior e exterior [Wh]

Q_{Cond} - Fluxo de calor por condução [Wh]

Q_{Gint} - Ganhos internos [Wh]

Q_{Radsol} - Ganhos térmicos devido à radiação solar [Wh]

R_{ph} - Numéro de renovação de ar por hora [-]

T - Temperatura [ºC]

TH - Teor de humidade [%]

U - Coeficiente de transmissão de calor [$W/m^{2\circ}C$]

UA - Perdas instantâneas por unidade de diferença de temperatura [W/ºC]

$W_{abs,\ 24}$ - Absorção de água após imersão em água durante 24 h [%]

ε - Coeficiente de emissividade [-]

λ - Coeficiente de condutibilidade térmica [W/m°C]

ν - Coeficiente de Poisson [-]

ρ - Massa volúmica [kg/m^3]

ρ_a - Massa volúmica do agregado seco [kg/m^3]

ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas [kg/m^3]

ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas em estufa [kg/m^3]

ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca [kg/m^3]

ρ_w - Massa volúmica da água [kg/m^3]

σ - Constante de Stefan-Boltzmann [W/m^2K^4]

σ_f - Tensão média de resistência à compressão [MPa]

δ_c - Massa específica do cimento [kg/m^3]

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das principais preocupações actualmente no sector da construção está relacionada com a redução dos consumos de energia. Os edifícios são importantes consumidores de energia, sendo responsáveis por cerca de 40% dos consumos energéticos da comunidade europeia. Em Portugal estima-se que os edifícios representam cerca de 29% do consumo global, sendo que 16% corresponde ao consumo residencial e 13% ao consumo de serviços (DGCE, 2006).

Através de estratégias de conceção e construção dos edifícios, é possível melhorar o comportamento e a eficiência energética dos mesmos, tendo em conta aspetos construtivos, a interação com o clima local, a escolha dos materiais e a aplicação da legislação específica em vigor.

Atualmente, o betão é o material mais utilizado na construção em elementos estruturais. Os betões designados por betões normais são caracterizados por elevada massa volúmica (2300 a 2500 kg/m^3) e coeficientes de condutibilidade térmica superiores a 1,5 W/m °C. Com o objetivo de reduzir a massa volúmica do betão e obter soluções mais leves e energeticamente mais eficientes, surge o betão estrutural com agregados leves (BEAL). A aplicação deste tipo de betão permite reduzir a carga permanente e o nível de acções sobre as estruturas, obter soluções construtivas mais esbeltas e melhorar o comportamento térmico. Geralmente, os BEAL são caracterizados por massas volúmicas inferior a 2000 kg/m^3 e coeficiente de condutibilidade térmica inferiores a1,0 W/m °C (Newman, 1993).

De acordo com as propriedades exigidas para os betões leves, estes poderão apresentar função estrutural, de isolamento térmico ou de enchimento. A aplicação deste tipo de betão tem grandes vantagens, sobretudo, em estruturas onde a redução de carga permanente é um factor condicionante para a sua viabilidade técnica e económica, como sucede em pontes, edifícios de grandes dimensões ou em obras de reabilitação. O aparecimento do betão leve estrutural é ainda importante em estruturas flutuantes e portuárias, por apresentarem maior flutuabilidade.

Em geral, é atribuído ao betão leve, comparativamente com o betão convencional, maior capacidade de isolamento, menor impacte na demolição, maiores índices de conservação de energia, menores exigências de transporte, elevada eficiência e durabilidade das estruturas.

Neste trabalho pretende-se contribuir para o melhor domínio e conhecimento dos betões estruturais de agregados leves, nomeadamente no que se refere ao seu desempenho em termos de isolamento térmico.

1.2. OBJECTIVOS

O presente trabalho tem como o principal objetivo analisar soluções estruturais alternativas ao betão convencional que visam alcançar um melhor desempenho energético dos edifícios sem comprometer de foram significativa a segurança e o comportamento estrutural dos mesmos.

Assim, pretende-se avaliar o comportamento térmico e energético de edifícios com soluções estruturais em betão leve. Para tal, numa primeira fase do trabalho, será efectuada uma campanha experimental que visa a caracterização física, mecânica e térmica de betões produzidos com agregados de argila expandida comercialmente disponíveis a nível Nacional, bem como betões de referência produzidos com agregados de massa volúmica normal. Serão analisados betões com diferentes relações a/c de modo a abranger misturas correntes de diferentes classes de resistência. De modo a optimizar o nível de eficiência em termos de isolamento térmico serão ainda caracterizados betões produzidos com incorporação de areias leves. Nesta fase, será efectuada a caracterização dos materiais utilizados bem como a caracterização dos betões produzidos em termos de massa volúmica, resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e coeficiente de condutibilidade térmica.

A avaliação do desempenho térmico das soluções preconizadas é realizada através da utilização de um programa informático de simulação dinâmica do desempenho térmico e energético de edifícios, designado por *EnergyPlus*.

Como objeto de estudo, utilizar-se-á uma fracção autónoma de um edifício e serão realizadas simulações energéticas para várias localidades com diferentes condições climáticas, e para uma gama de soluções para os elementos estruturais da envolvente exterior com diferentes tipos de betão normal e leve.

As características térmicas e mecânicas do betão leve a avaliar no presente trabalho, bem como os de betão de referência com agregados normais serão definidos na campanha experimental que tem em consideração diferentes composições pré-definidas.

No programa *EnergyPlus* são introduzidas as características relativas ao edifício, como a sua geometria, os materiais constituintes e suas propriedades, a localização, os dados climáticos e o programa, por sua vez, devolve diversos resultados sobre o comportamento térmico e energético dos edifícios. O programa oferece a possibilidade de se escolher o intervalo de tempo pretendido para a simulação dinâmica, o que permite analisar o comportamento térmico e energético do edifício ao longo do tempo.

A análise térmica dos casos de estudo, visa contribuir para um melhor conhecimento do desempenho térmico e eficiência energética das soluções em betão leve em edifícios, comparativamente com edifícios com soluções tradicionais.

Para a concretização do objetivo principal, o estudo foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

- Caracterização mecânica e térmica dos betões leves produzidos e comparação face aos betões de referência com agregados normais;

- Avaliação e análise do consumo energético nos vários cenários do caso de estudo, para as estações de aquecimento e arrefecimento;
- Análise das trocas de calor nos cenários analisados do caso de estudo, para as estações de aquecimento e arrefecimento;
- Comparação dos consumos energéticos e das trocas de calor observadas nas soluções com betões leves estruturais e betões de massa volúmica normal de igual composição.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos e 9 anexos, entre os quais se insere este primeiro capítulo de introdução.

O segundo capítulo introduz o tema de betões leves, apresentando o contexto histórico, sistema construtivo, tipos de betões leves, vantagens e desvantagens da utilização desta solução, análise do comportamento térmico dos edifícios e por fim uma análise bibliográfica de estudos relativos ao comportamento térmico de edifícios com soluções em betão leve.

No terceiro capítulo é abordado a campanha experimental, apresentando a discrição das normas dos ensaios de caracterização dos agregados e do betão no estado fresco e endurecido, obtendo as propriedades mecânicas e térmicas, formulação dos betões produzidos e por fim a apresentação e discussão dos resultados experimentais.

No quarto capítulo é abordado o programa de simulação energético *EnergyPlus*, sendo discutido o seu funcionamento, apresentação dos campos de entrada do programa, descrição do caso de estudo e uma análise do consumo energético e das trocas de calor dos cenários do caso de estudo. Outros objetos de a análise são os coeficientes de transmissão de calor dos elementos estruturais e espessuras mínimas de isolamento térmico. Também é realizado uma análise comparativa entre os betões normais e leves de composição semelhante, avaliando a poupança de consumo energético e a redução das trocas de calor.

O quinto capítulo é dedicado às conclusões e desenvolvimentos futuros.

Nos anexos, como complemento ao trabalho, apresenta-se os resultados detalhados da análise granulométrica dos agregados, dos cálculos complementares da composição dos betões e dos resultados experimentais do betão no estado fresco e endurecido.

No anexo I, apresenta-se duas plantas da fracção autónoma utilizada como caso de estudo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. BETÕES LEVES

De acordo com o EN 13055-1 os betões leves podem ser caracterizados por massas volúmicas entre cerca de 300 e 2000 kg/m^3 e condutibilidades térmicas entre 0,2 e 1,0 W/mK. Nesta categoria existem 3 tipos de betões leves: betões com agregados leves, os betões celulares e betões sem finos (Spratt,1980).

2.1.1. Definição e enquadramento

São duas das principais características dos betões leves a reduzida massa volúmica e a condutibilidade térmica. A densidade do betão pode ser reduzida de várias formas, tais como: a incorporação de agregados de baixa densidade na composição do betão; a utilização de espumas celulares ou o aumento de vazios no betão através da introdução de ar (*high air*); a não utilização de agregados finos na composição do betão (Holm e Bremner, 2000).

Na Figura 2.1, esquematiza-se os diferentes tipo de betão leve dependendo da forma como se procede a inclusão de vazios na mistura, intervindo na fase de agregados ou na matriz (Bogas, 2011).

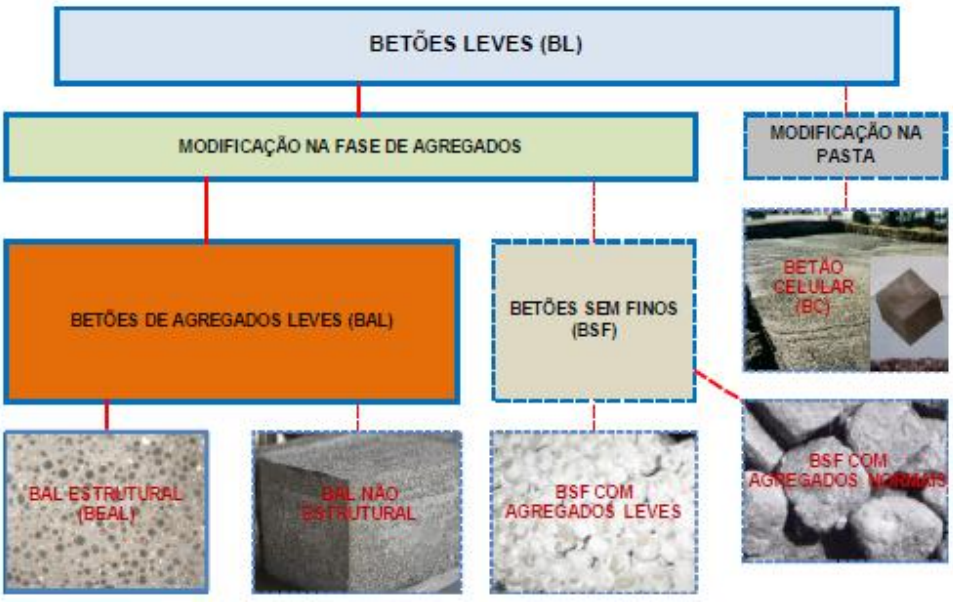


Figura 2.1 - Diferentes tipos de betão leve (Bogas, 2011)

O processo de produção do betão com agregados leves consiste na utilização de agregados leves em substituição parcial ou total dos agregados utilizados no betão convencional. Os agregados leves podem ser agregados naturais, de origem vulcânica ou artificiais, tais como, escória expansivo de alto-forno, argila, xisto, ardósia expandida, vermiculita e agregados de clínquer. A característica principal dos agregados leves é a sua alta porosidade que resulta num peso específico mais baixo.

O betão de agregados leves pode ser dividido em dois tipos, segundo a sua aplicação: betão leve de isolamento ou enchimento; e betão estrutural de agregados leves.

Existe apenas um pequeno grupo restrito de agregados com características mecânicas suficientes para produção de betões leves estruturais. Apenas as variedades mais densas de agregado leves são adequados para uso de betão estrutural (Samidi, 1997).

Os betões designados de “celulares” são produzidos pela introdução de ar ou gás dentro da matriz cimentícia, conseguindo obter vazios superiores a 50% (Tikalsjy, Poapisil e Mac Donald, 2004). A estrutura porosa deste tipo de betão é atingida por incorporação de bolhas de ar estáveis na pasta de cimento, formadas por uma reação através de um agente químico expansivo do tipo orgânico ou metálico. O volume de ar inserido irá influenciar a massa volúmica e a resistência deste tipo de betões.

Este tipo de betão é adequado para soluções não estruturais, devido aos valores reduzidos de resistência e massa volúmica. Para além da sua principal vantagem ser a de leveza, estes materiais são aplicados como isolamento térmico e acústico, como soluções de enchimentos ou de regularização de superfícies, blocos de alvenaria, painéis pré-fabricados, preenchimento de solo, etc. (Spratt, 1980), (Freitas, Allende e Darwish, 2006). Os betões celulares com incorporação de gás que são curados em auto-clave a alta pressão e elevada temperatura, permitem betões com resistências mais altas, e são adoptados em fábricas de betão pré-fabricado.

Por último, o betão leve sem finos consiste na criação de vazios por omissão de agregados finos. A utilização exclusiva de pasta e de agregados grossos irá implicar menor compacidade da mistura, e consequentemente influenciará a massa volúmica e a resistência mecânica. Os espaços deixados pelos vazios entre as partículas serão responsáveis pelo baixo valor da resistência e massa volúmica, pela reduzida ascensão capilar e pelo elevado volume de absorção (Neville 1995), (Spratt1980). A resistência à compressão pode variar entre 1,5 e 14 MPa, dependendo da massa volúmica do betão. As suas principais aplicações são para fins de enchimento e paredes autoportantes.

2.1.2. Normalização

A principal característica dos betões leves é a sua baixa massa volúmica. Na maior parte dos documentos normativos esta propriedade e/ou da resistência à compressão são os principais requisitos para a sua classificação.

De acordo com as propriedades pretendidas para o betão leve, este poderá ter finalidades diferentes com função estrutural, de isolamento térmico ou de enchimento. Cembureau (1974) classifica o betão leve de acordo com a sua função em três classes:

- Betão para isolamento térmico, caracterizado por ter uma massa volúmica reduzida;
- Betão leve com resistência e massa volúmica compatível com a sua aplicação em elementos estruturais;
- Betão leve de propriedades intermédias com resistências moderadas, adequado para soluções não estruturais.

De acordo com o CEB-FIP (1977), o betão leve estrutural é caracterizado por ter massas volúmicas secas entre 1600 e 2000 kg/m^3 e resistências superiores a 15 MPa, sendo o betão leve dividido em três classes. No documento FIB (1983), o betão leve é igualmente dividido em três classes, o primeiro grupo, com resistência entre 20 e 40 MPa e massa volúmica entre 1600 e 1750 kg/m^3, destinado para betão armado corrente aplicado *in situ*. O segundo grupo é caracterizado por betões com resistência entre 40 a 50 MPa e massa volúmica entre 1700 e 2000 kg/m^3, vocacionados para pré-fabricação. Finalmente, o terceiro grupo com betões entre 50 a 70 MPa, adequados para elementos pré-esforçados.

O betão leve segundo a norma Europeia NPEN 206-1 (2005) é caracterizado por ter massas volúmicas após a secagem em estufa entre 800 e 2000 kg/m^3, podendo ser divididos em subclasses de massa volúmica, conforme indicado no Quadro 2.1. Segundo esta norma, o betão leve só pode ser produzido utilizando agregados leves, de forma parcial ou integral. São previsto betões com classes de resistência entre LC 8/9 e LC 80/88, considerando-se de elevada resistência os betões de classe superior a L55/60. Esta classificação é igualmente adoptada no Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1 2004).

Quadro 2.1 - Classe de massa volúmica do betão de agregados leves (NPEN 206-1 2005)

Classe de massa Volúmica	**D1,0**	**D1,2**	**D1,4**	**D1,6**	**D1,8**	**D2,0**
Massa volúmica (kg/m^3)	≥ 800	>1000	>1200	>1400	>1600	>1800
	≤1000	≤1200	≤1400	≤1600	≤1800	≤2000

Nos EUA, os betões de agregados leves são divididos em três classes, de acordo com as suas propriedades e funções. Os betões ultra leves têm fraca resistência mecânica entre 0,7 e 3,4 MPa (ASTMC332, 1999), com propriedades de isolamento. Os betões com propriedades mecânicas intermédias, possuindo alguma capacidade térmica, são destinados a soluções de enchimento ou elementos autoportantes. Estes betões são caracterizados por resistências entre 3,4 e 17 MPa e massa volúmicas de equilíbrio entre 800 e 1440 kg/m^3 (ASTMC331, 2004).

Finalmente, os betões leves estruturais são especificados nos documentos ACI211.2 (1998), ACI318 (2009), ASTMC330 (2004) e ACI213R (2003). De acordo com as primeiras três normas, o betão leve estrutural é caracterizado por possuir resistência mínima à compressão de 17,2 MPa aos 28 dias, e uma massa volúmica de equilíbrio máxima de 1842 kg/m^3. A norma mais recente, ACI213R (2003), prevê a mesma resistência mínima à compressão, mas uma massa volúmica de equilíbrio máxima de 1920 kg/m^3. Esta norma ainda define valores mínimos de resistência à compressão de 40 MPa para betões de agregados leves estruturais de alta resistência.

Como se pode verificar, a definição dos betões de agregados leves estruturais não é unânime nas normalizações existentes, principalmente em relação aos limites estipulados e tipo de massa volúmica considerada.

2.1.3. Aplicações

Neste subcapítulo, resumem-se algumas das principais aplicações dos betões leves, nomeadamente, no que diz respeito a: edifícios, pontes e plataformas *offshore*.

2.1.3.1. Edifícios

Os betões leves são aplicados em edifícios altos por que este tipo de solução em relação aos betões convencionais permite um maior aligeramente da estrutura por redução do seu peso próprio.

A utilização do betão leve permite ainda meios de elevação de menor capacidade de carga (Heimdal, 1999), novas soluções arquitetónicas mais arrojadas, menores esforços ao nível das fundações e elementos mais esbeltos. Além disso, as melhores capacidades de isolamento térmico e o elevado desempenho ao fogo justificam o uso deste tipo de betões.

Um exemplo de aplicação de betões leves em edifícios de grande altura é a Torre Picasso, em Madrid, Espanha. O edifício possui 45 andares e foi projetado pelo arquiteto Minoru Yamasaki (FIB, 2000). Neste edifício foi utilizado Arlita, com uma baridade de 0.75 g/cm^3, massa volúmica das partículas de 1,38 g/cm^3 e granulometria compreendida entre 3 e 8 mm. Este material foi pré-molhado até cerca de 40% do seu peso, para garantir a bombagem do betão. Foram utilizados cerca de 10.000 m^3 de betão com uma classe de consistência S4, uma classe de densidade D2,0 e uma classe de resistência LC20/22.

Figura 2.2 - Edifício Torre Picasso

2.1.3.2. Pontes

A utilização integral ou parcial de betão de agregados leves em pontes tem sido uma das mais amplas aplicações deste tipo de betão.

O principal objetivo da utilização do betão leve é a diminuição do peso próprio, reduzindo a carga nas fundações e os esforços na estrutura, e consequentemente reduzindo os efeitos sísmicos (Murillo, Thoman e Smith, 1994). O betão leve apresenta também vantagens durante a fase construtiva em solução de avanços sucessivos. Este betão ao apresentar uma menor densidade comparativamente com o betão normal permite um menor desgaste do equipamento e maiores avanços. A redução do

peso próprio permite ainda a construção de pontes em elementos pré-fabricados que possam vencer vãos superiores aos alcançados com a utilização de betão convencional (Vieira, 2000).

Segundo o manual Técnico da Arlita, em ponte de 50 m de vão a redução do peso próprio é da ordem dos 18% e para vãos de 100 m é de 24% (Arlita, 2001).Em relação à utilização de betão de agregados leves na construção de pontes, resumem-se as seguintes observações obtidos da experiência americana.

- A redução do peso próprio tem sido vantajoso nos casos em que as fundações se apresentam pouco resistentes, conduzido o melhor desempenho sísmico;
- Alargar ou substituir os tabuleiros de pontes existentes sem intervenção ao nível da infraestrutura;
- A realização de tabuleiros mistos aço-betão, com betão de agregados leves leva geralmente a significativas reduções nos custos totais, ou seja, soluções mais económicas;
- A obtenção de maiores vãos com elementos pré-fabricados;
- O aumento competitividade do betão leve em processos de construção por avanços sucessivos,
- Os exemplos obtidos de durabilidade em estruturas de betão leve com mais de meio século.

A título de exemplo, pode referenciar-se a ponte *Nordhordland*na Noruega. Trata-se de uma ponte suspensa inaugurada em 1994, cuja superestrutura metálica assenta sobre pontões flutuantes totalmente fabricados em BEAL, inaugurada em 1994 (Johnsen, Helland e Heimdal, 1995). O comprimento total da ponte é de 1615 m, apresentado a parte flutuante um comprimento de 1246 m. A superestrutura é suportada por pontões em betão leve cuja massa volúmica é de 1900 kg/m^3 e classe de resistência LC 55/60. A utilização de BEAL nos potões foi essencial para garantir condições estáveis de flutuabilidade e reduzir a transmissão de vibrações das ondas e do vento (Melby, 2000), (Jakobsen, 2000).

Figura 2.3 - Ponte Nordhordland, Noruega

2.1.3.3. Plataformas *Offshore*

Os betões leves de alta resistência têm sido usados na construção de estruturas flutuantes e portuárias por duas razões principais: (a) maior flutuabilidade, (b) maior resistência específica, ou seja, a relação entre a resistência e o peso específico (Cruz e Magalhães, 2000).

A redução usual de 25 a 30% na massa volúmica dos betões de agregados leves comparativamente aos betões convencionais transforma-se em cerca de 43 a 51% quando são submersos. Esta característica torna os betões estruturais de agregados leves (BEAL) especialmente atrativos para estruturas flutuantes. A utilização dos BEAL nestas estruturas, ao fazer reduzir a carga permanente, vai permitir melhorar a flutuabilidade e aumentar a capacidade de carga no topo da plataforma.

Estas estruturas estão expostas aos mais variados ambientes, sendo alguns extremamente agressivos. As plataformas *offshore* são exemplos de que as estruturas com betão de agregados leves podem ter bom desempenho às ações a que estão sujeitas.

A maioria das plataformas flutuantes são construídas em estaleiro, sendo posteriormente transportadas para o local desejado, logo é necessário reduzir o seu peso, principalmente se no percurso tiver de atravessar zonas de baixa profundidade. Verifica-se que é vantajoso na conceção destas estruturas recorrer integral ou parcialmente a betões de agregados leves de elevado desempenho, por estarem sujeitas a ambientes agressivos (Holm e Bremner, 1992), (Malhotra, 1987).

A plataforma *Hibernia* na América do Norte é uma das obras mais significativas neste domínio tendo sido fundada com cerca de 80 m de profundidade. Utilizou-se um betão de massa volúmica modificada constituído por uma mistura de 50% de xisto expandido com 50% de agregados de massa volúmica normal, conferindo-lhe uma resistência à compressão de 80 MPa e uma massa volúmica de aproximadamente 2200 kg/m^3, sem alterar significativamente as suas características mecânicas (Maage, 1998).

Figura 2.4 - Plataforma Hibernia (Bogas 2011)

Conforme mencionado, a maioria destas estruturas são dimensionadas para períodos de vida relativamente longos em condições ambientais severas, destacando a capacidade resistente e a durabilidade dos BEAL.

2.1.4. Principais propriedades dos agregados leves

A resistência à compressão e massa volúmica desejável para o betão são os principais factores que determinam a escolha do agregado leve apropriado para uma determinada aplicação (CEB/FIB, 1977). As propriedades do agregado, incluindo a massa volúmica, a absorção e a resistência, são influência das pela estrutura interna porosa do material (Zhang e Gjorv, 1991).

2.1.4.1. Massa Volúmica

A massa volúmica do agregado é a razão entre a massa de uma quantidade de material e o volume absoluto ocupado pelas partículas da amostra. Neste volume são incluídos os vazios internos do agregado.

A massa volúmica das partículas influencia diretamente na massa volúmica do betão, e tende a evoluir proporcionalmente com a sua capacidade resistente. De acordo com o definido na NPEN 206-1 (2005), o agregado leve deve possuir massa volúmica inferior a 2000 kg/m^3.

2.1.4.2. Resistência

A resistência do agregado leve varia com o tipo, processo de fabrico, estrutura interna, dosagem e dimensão máxima das partículas. A porosidade é uma propriedade que exerce uma grande influência na resistência dos agregados.

A capacidade resistente dos agregados leves influencia diretamente a resistência do betão leve, com a superfície de rotura a atravessar os agregados, em oposição ao comportamento que se verifica nos betões com agregados de massa volúmica normal.

Nos BEAL, a pasta de cimento deixa de ser o elemento mais fraco e, como tal, a resistência destes betões pode ser limitada pela capacidade resistente dos agregados (Hammer, 1995), (Zhang e Gjorv, 1991), (Holm e Bremner, 2000).

Em geral, a resistência do betão é maior para os agregados leves de maior massa volúmica (CEB/FIB 1977). Quando o betão é sujeito a uma carga uniaxial, a resistência dos agregados tende a melhorar devido ao confinamento lateral exercido pela argamassa (Zhang e Gjorv, 1990). Assim, a resistência do agregado deve ser aferida através de ensaios no betão (Faust, 2000).

2.1.4.3. Estrutura interna dos agregados

Os agregados leves são caracterizados por um estrutura interna porosa, composta por vazios ou poros formados durante o processo de fabrico dos agregados, que variam no tamanho e na forma. A maioria dos agregados leves apresentam poros interconectados, que contribuem para o transporte de substâncias através do agregado, tornando-se suscetíveis à absorção de água (CEB/FIB, 1977), (Zhang e Gjorv, 1991).

A porosidade dos agregados tem influência na sua aderência com a matriz de cimento, além de afetar outras propriedades como, a resistência, a absorção e a permeabilidade. Quanto maior a porosidade interna dos agregados, menor será a massa volúmica, a condutibilidade térmica e a resistência do betão com eles produzidos.

Em geral, os agregados leves são compostos por poros de dimensão variável entre cerca de 5 à 300 μm (Holm e Bremner, 2000).

2.1.4.4. Forma e textura da superfície das partículas

Dependendo da fonte e do método de produção, os agregados leves podem apresentar diferenças consideráveis na dimensão e textura das partículas. Em termo de formas estes podem variar de aproximadamente esférica e regular a angular e irregular. Em relação à textura, a superfície das partículas pode variar desde macroscopicamente lisa a rugosa e irregular. Os agregados de argila expandida produzidos em forno rotativo, conforme os utilizados no presente trabalho, apresentam formas aproximadamente esférica e superfície macroscopicamente lisa, embora suficientemente rugosa para garantir uma boa aderência agregado-ligante.

Os tamanhos (forma) podem ser cúbica, redonda, angular ou irregular. As texturas podem ser poros finos relativamente pele lisa, ou superfície altamente irregular com grandes poros expostos.

De acordo com o CEB/FIB (1977) a forma e a textura da superfície influenciam indiretamente a resistência do betão, pois afetam a quantidade de água necessária para produzir um betão com trabalhabilidade adequada.

Segundo ACI 213R-87 (Structural Lightweight Aggregate Concrete) a forma e a textura dos agregados influenciam os principais factores relacionados com a formulação do betão; desde a trabalhabilidade, a relação entre agregado fino e grosso, teor de cimento, a exigência de água, bem como outras propriedades físicas (Holm e Bremner; 2000).

2.1.4.5. Módulo de Elasticidade

A rigidez do agregado leve é menor do que a dos agregados de massa volúmica normal (CEB/FIB, 1977). Esta propriedade tem influência direta na resistência, na deformabilidade, na compatibilidade elástica e na retracção dos betões leves (FIP, 1983), (Faust, 2000), (Hammer, 1995). De acordo com Muller-Rocfholz (1979) o módulo de elasticidade dinâmico (E_a) de uma partícula individual de agregado leve pode ser estimado pela equação (2.1), em que ρ_a é a massa volúmica do agregado seco.

$$\mathbf{E_a = 0,008\rho_a^2};\quad \rho_a \ \text{em kg/m}^3 \text{ e } E_a \text{ em MPa} \tag{2.1}$$

O módulo de elasticidade dinâmico dos agregados leves expandidos mais usuais varia de 10 a 16 GPa (Muller-Rocfholz, 1979). Segundo o FIP (1983), os agregados leves correntemente utilizados em betões estruturais apresentam módulos de elasticidade entre 5 e 15 GPa, enquanto os agregados convencionais varia entre 30 e 100 GPa (Holm, 1994).

2.1.4.6. Absorção

Os agregados leves têm maior capacidade de absorção de água comparativamente aos agregados de massa volúmica normal. A absorção de água nos agregados é definida como a quantidade de água que é absorvida ou penetrada nas partículas, sendo determinada em termos de percentagem da massa seca do agregado (EN13055-1, 2002).

A absorção de água afeta a trabalhabilidade do betão, assim como outras propriedades do betão, como a massa volúmica e as deformações diferidas (CEB/FIB, 1977), (Holm, 1994). Em geral, os agregados leves utilizados em betão estrutural têm capacidade de absorção entre 5 e 25% (Holm, 1994).

A taxa de absorção de água dos agregados depende das características da sua porosidade, nomeadamente a geometria, a dimensão, a distribuição e a interconectividade com o exterior e da densidade da película exterior que envolve a partícula (Holm, 1994). Esta taxa, também, é influenciada pela qualidade e pelo volume da pasta de cimento, e a sequência de mistura do betão (Punkkin e Gjorv, 1993).

2.1.5. Principais propriedades dos betões estruturais produzidos com agregados leves

2.1.5.1 Características gerais

Os betões estruturais com agregados leves possuem algumas propriedades que os diferenciam dos betões convencionais de agregados normais, como é o caso da massa volúmica, as características de isolamento térmico e o transporte de água entre o agregado e a pasta cimentícia. Estas propriedades afetam outros aspetos relacionados com as características do betão fresco e endurecido (EuroLightConR2, 1998).

Uma característica muito importante dos betões com agregados leves é a sua melhor capacidade de flutuabilidade. A redução usual entre 20 a 30% na massa volúmica dos betões leves comparativamente aos betões convencionais transforma-se em aproximadamente 43 a 51% quando estes são submersos.

As empresas petrolíferas tem mostrando interesse na investigação e utilização destes materiais em plataformas *offshore*, visto que, o betão estrutural com agregados leves é especialmente atrativo para estruturas flutuantes. A utilização de betão estrutural com agregados leves reduz a carga permanente, permite melhorar a flutuabilidade e diminui a volumetria ou aumenta a capacidade de carga no topo da plataforma.

Os BEAL, em geral, exigem maiores dosagens de ligante por razões de resistência e estabilidade do betão fresco, embora a quantidade dependa do tipo de agregado utilizado. A estabilidade está relacionada com a capacidade de retenção da água e dos agregados grossos da mistura, caracterizada

pela coesão, ou seja, está relacionada com a propriedade da mistura resistir à segregação e exsudação (Mehta e Monteiro, 2006).

Assim, devem ser previstas dosagens de ligantes suficientes para garantir níveis de coesão elevados que contrariem a subida dos agregados leves e o adequado envolvimento dos agregados pela pasta. O FIP (1983) recomenda o uso de agentes de viscosidade para aumentar a coesão das misturas cuja estabilidade seja mais difícil de controlar.

A consideração de maiores dosagens de ligante na formulação do betão leve está também relacionada com a maior exigência do tipo de estruturas onde os betões estruturais com agregados leves têm sido utilizados (Pankhurst, 1993).

O betão é um material compósito constituído por diferentes elementos com rigidezes diferentes, o que resulta na distribuição de tensões não-uniformes originando a concentração de tensões na interface e subsequente desenvolvimento de microfendilhação. A microfendilhação entre os constituintes do betão tende a ser mais elevada quanto maior for a diferença de rigidez entre os agregados e a matriz.

Os agregados leves apresentam rigidezes mais próximas da argamassa envolvente, comparativamente com os agregados de massa volúmica normal, existindo uma maior compatibilidade elástica entre as fases e o menor desenvolvimento de microfendilhação (Holm e Bremner, 2000) (EuroLightConR14, 2000) (Zhang e Gjorv, 1990d). Contudo, em betões de elevada resistência, onde é exigido argamassas fortes, a compatibilidade elástica tende a diminuir.

A compatibilidade elástica assume um papel relevante na resistência do betão, mas tem ainda maior importância noutras propriedades como a retracção, tracção, permeabilidade e durabilidade, devido à microfendilhação resultante.

Segundo vários autores, os betões estruturais de agregados leves apresentam níveis de porosidade e fendilhação inferiores aos dos betões convencionais (Holm e Bremmer, 2000), (EuroLightConR2, 1998), (Zhang e Gjorv, 1990d), e na rotura, tendem a propagar-se as fendas pelo agregado, demonstrado que a zona de transição agregado-pasta tem menor influência na resistência.

Os BEAL apresentam adequada resistência, tanto à penetração de água do mar como de água corrente, atribuindo essa razão à melhor ligação agregado-pasta. A ligação agregado-pasta é a principal responsável por ocorrerem desvios da resistência baseados apenas na relação água/cimento, tendo especial influência no comportamento em tracção, na permeabilidade e na durabilidade dos BEAL.

Verifica-se que os BEAL são menos sensíveis a condições de cura adversas, dado que estes são beneficiados pelo efeito de "cura interna", ao contrário dos betões convencionais. O mecanismo de cura interna resulta da restituição da água inicialmente absorvida pelos agregados para a argamassa, após o endurecimento e secagem do betão (Holm e Bremer, 2000). A cura do betão tem forte influência nas características mecânicas e na durabilidade dos betões a diferente idades (Mehta e Monteiro, 2006), (Mindess, Young e Darwin, 2003).

Segundo Mourin e Vaquier (1986), devido ao efeito da cristalização dos constituintes hidratados no início do endurecimento do betão, o diâmetro dos poros da argamassa passa a ser inferior ao dos poros capilares dos agregados, fazendo com que o sentido de transporte da água ocorra dos agregados para a argamassa.

2.1.5.2 Resistência mecânica

A massa volúmica é a principal característica que distingue os BEAL dos betões convencionais. Esta propriedade depende especialmente do volume, teor em água, absorção e tipo de agregados leves, e em menor escala de factores como o teor de cimento e adições, relação a/l, introdução de ar, método de compactação e relação grossos/finos (FIP, 1983), (Virlogeux, 1986) (Bogas, 2011).

O volume de agregados ocupa aproximadamente 70% do volume de betões leves, sendo, por este motivo, o principal factor a afetar a massa volúmica. Assim a utilização de agregados com diferentes massas volúmicas das partículas, pode proporcionar grandes variações nesta propriedade (FIP, 1983). De acordo com o FIP 1983, utilizando agregados adequados, os BEAL podem ser produzidos com massas volúmicas 25 a 40% inferiores, em relação os betões com agregados normais.

Segundo o EuroLightCOnR2 (1998), a massa volúmica pode ser utilizada como um indicador da resistência dos BEAL. De facto, esta propriedade é afetada pela relação a/l (água/ligante) e proporção de agregados leves, que condicionam as características mecânicas e de durabilidade dos BEAL.

Pode considerar-se que a massa volúmica dos BEAL varia geralmente entre 1200 e 2000 kg/m^3 (NPEN206-1, 2004), com a maioria dos betões leves estruturais de moderada a elevada resistência a apresentar massa volúmica superior a 1600 kg/m^3 (CEB-FIP, 1977). Nos BEAL, a massa volúmica é governada pela massa volúmica do agregado, que por sua vez tende a evoluir proporcionalmente com a sua capacidade resistente (FIP, 1983).

Um dos aspetos mais relevantes, que caracteriza os BEAL é o facto de que estes apresentam módulos de elasticidade bastantes inferiores (do que o módulo de elasticidade dos betões convencionais). Este facto resulta da menor rigidez dos agregados leves, com valores inferiores a 15 GPa, face aos 30 a 100 GPa apresentados pelos agregados de massa volúmica normal. Por outro lado, os BEAL apresentam maiores volumes de pasta, o que contribui para menores módulos de elasticidade face aos betões convencionais de igual resistência (Newman, 1993).

O módulo de elasticidade do betão é essencialmente controlado pela proporção e rigidez dos seus constituintes, nomeadamente, a pasta de cimento e os agregados. Segundo Cánovás (2004), a geometria e textura dos agregados são também importantes na forma como afetam a microfendilhação na zona de transição, alterando o comportamento do betão em termos de tensão-deformação.

A principal consequência da menor rigidez dos BEAL é o aumento de deformação nos elementos estruturais, para um dado carregamento, que tende ainda a ser agravada devido à menor resistência à tracção deste tipo de betões.

De acordo com o FIP (1983), pode considerar-se que o módulo de elasticidade nos BEAL correntes é aproximadamente 50% do observado nos betões convencional com agregados de massa volúmica normal (BAN) de igual resistência. De acordo com Chi (2003) e Faust (2000b), a relação a/c (água/cimento) e as características dos agregados são os dois principais factores que afetam a resistência à compressão e o módulo de elasticidade nos BEAL. Em geral, estima-se o módulo de elasticidade dos BEAL em função da resistência e massa volúmica do betão devido à dificuldade em determinar as propriedades elásticas dos agregados leves (Neville, 1997), (Faust, 2000b).

2.1.5.2.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é uma das características mais importantes dos betões, que usualmente se relaciona com outras propriedades como a rigidez, a permeabilidade e a durabilidade. Em geral, a resistência de um material sólido é essencialmente condicionada pela sua porosidade (Mehta e Monteiro, 2006), (Neville 1995), (Mindless, Young e Darwin, 2003).

A resistência à compressão do betão é influenciado por vários factores, como o tipo e a dosagem de cimento, a granulometria, o diâmetro máximo, a forma, a textura, a resistência e a rigidez dos agregados, a relação água/materiais cimentíceos, o tipo e dosagem de aditivos químicos, o grau de compactação, as condições de cura e o procedimento de ensaio; entre outros (Mehta e Monteiro, 2006), (Neville, 1995), (Mindess, Young e Darwin, 2003).

A maioria deste factores influência a resistência de modo a alterar a porosidade dos diferentes constituintes do betão, que dependendo da dimensão e da distribuição dos poros condicionará mais ou menos a sua capacidade resistente (Neville, 1995). De salientar que maiores relações a/c implicam pastas de porosidade superior, sendo este o principal factor que controla a maioria das propriedades mecânicas (FIB 1983), (Virlogeux, 1986).

Em comparação com os betões convencionais, a resistência à compressão dos BEAL correntes vai ser determinada pela capacidade resistente da argamassa e do agregado. A distribuição de tensões entre estas duas fases é comandada pelas suas características elásticas (Chen, Yen e Lai, 1995). Contudo, os agregados têm uma participação mais importante, porque irão afetar a forma como os restantes constituintes influenciam a resistência do betão.

A resistência do BEAL ao contrário do que sucede nos betões convencionais, não depende exclusivamente da relação água/cimento e da resistência do cimento, logo os agregados assumem um papel mais relevante no comportamento deste tipo de betões (FIP, 1983).

Assumindo que a resistência do agregado é inferior à da pasta cimentícia, a resistência à compressão nos betões leves vai ser naturalmente inferior à dos betões de agregados normais, para um idêntica relação água/cimento (FIP, 1983), (Newman, 1993). Quando a resistência à compressão é o parâmetro crítico, a melhor solução é utilizar um tipo de agregado leve com maior capacidade resistente e maior massa volúmica (Hammer, 1995).

De acordo com ACI 213R *Structural Lightweight Aggregate Concrete* (ACI 213R-87), os níveis usuais de resistência à compressão exigidos na construção civil podem ser obtidos com betões de agregados leves estruturais para resistências entre 20 e 35 MPa.

2.1.5.2.2. Resistência à Tracção

A resistência a tracção é uma propriedade que depende essencialmente dos mesmos factores que influenciam a resistência à compressão. Alguns destes factores são a natureza, a forma e a dimensão dos agregados, a relação a/l e a idade do betão (Canovas, 2004), (Neville, 1995), (Mehta e Monteiro, 2006).

A qualidade da zona de transição agregado-pasta é um factor importante na resistência à tracção (Mehta e Monteiro, 2006), assumindo maior relevância na resistência à tracção do que na resistência à compressão. A resistência à tracção do betão depende, também da resistência à tracção dos agregados, da argamassa envolvente e de forma como estes elementos se ligam (Holm e Bremner, 2000).

No betão estrutural com agregados leves, a superfície de rotura à tracção atravessa os agregados de menor capacidade resistente e a resistência à tracção tende a ser inferior à dos betões convencionais de igual composição.

As principais diferenças, no que respeita ao comportamento à tracção dos betões estruturais com agregados leves (BEAL) em relação aos betões de agregados normais, estão relacionados com o modo de rotura e o teor de água no betão. A superfície de rotura atravessa os agregados em vez de os contornar. Os betões leves apresentam maiores teores em água devido à maior absorção de seus agregados, sendo responsável pelo aparecimento de gradientes de humidade mais elevados e consequentemente maiores reduções na resistência a tracção (Newman, 1993) (Bogas, 2011).

2.1.5.3 Propriedades de isolamento térmico

A condutibilidade térmica λ, define-se como a quantidade de calor que atravessa um cubo com um metro de aresta, quando se submetem as suas faces opostas a uma diferença de temperatura de 1ºC, durante 1 segundo. A condutibilidade térmica do betão depende principalmente da sua massa volúmica e do seu teor de humidade, mas é também, influenciada pelo tamanho e distribuição dos poros, pela composição química e textura dos componentes sólidos (cristalina, amorfa, gasosa) e pela temperatura. Os materiais cristalinos (exemplo: quartzo) conduzem melhor o calor do que os materiais amorfos (exemplo: vidro). Os materiais vítreos (exemplo: escória de alto forno) possuem particularmente baixa condutibilidade térmica.

Apesar do teor em água ter influência na massa volúmica, este assume maior relevância na variação da condutibilidade térmica. A um acréscimo de 1% no teor de água corresponde um aumento cerca de 5 a 9% na condutibilidade térmica (Holm e Bremner, 2000). Os ensaios com temperatura que variem

entre os 20 e 60 °C, indicam que o coeficiente de condutibilidade térmica do betão é afetado levemente pelas mudanças de temperaturas.

O betão leve por ser constituído por agregados de menor massa volúmica apresenta menor coeficiente de condutibilidade térmica, sendo uma solução com melhores características de isolamento térmico, contribuindo desta forma para uma edificação sustentável.

Em geral, a condutibilidade térmica aumenta com a massa volúmica, teor de humidade e temperatura. (Newman, 2003), (FIP, 1983). No Reino Unido é admitido que existe uma relação empírica entre a condutibilidade e a massa volúmica, para um dado teor de humidade e de classe de material. Para betões leves ou com massa volúmica normal, os valores da condutibilidade são dados para massas volúmicas de betão entre 400 e2400 kg/m^3,e teores de humidade de 3% (ambiente protegido) e 5% (ambiente exposto). Estas relações são apresentadas na Figura 5 e estão de acordo com a curva de ajuste expressa por (2.2):

$$\boldsymbol{K = c^{\lambda}} \qquad (2.2)$$

Em que K é a condutibilidade térmica, *c* é um constante e *λ* é a massa volúmica seca. A constante c pode tomar os seguintes valores:

Teor de humidade 3%, c=0.085,

Teor de humidade 5%, c=0.093.

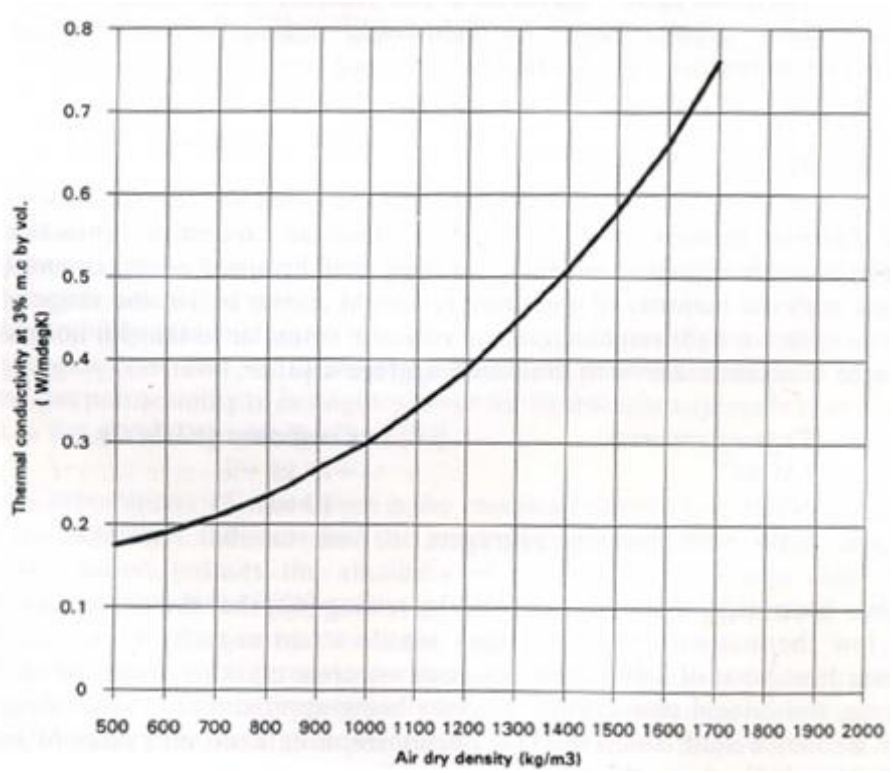


Figura 2.5 - Curva de relação entre condutibilidade térmica e a massa volúmica (Clarke, 1993)

2.2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS EDIFÍCIOS

Um edifício é considerado um sistema que interage com o exterior sob a forma de transferência de calor. Existem múltiplos factores que influenciam as trocas de calor como a temperatura exterior, a radiação solar, a humidade do ar e o vento atmosférico. Além dos factores externos, existem também os factores internos como o funcionamento de equipamentos e a própria ocupação do lugar.

A transferência de calor, ou seja, a energia transferida sob forma de calor devido um gradiente térmico, poderá se dar por três fenómenos distintos: condução, convecção e radiação.

Os edifícios devem proporcionar aos utilizadores o conforto térmico. O uso de equipamentos de arrefecimento e/ou aquecimento poderia ser uma solução, embora não seja a mais económica. É fundamental pensar-se em soluções construtivas que melhorem o comportamento térmico dos edifícios, no sentido de minimizar as trocas de calor e de economizar energia para a obtenção das condições de conforto pretendidos.

Entende-se por envolvente térmica de um edifício a parte que separa o interior do edifício do exterior ou de espaços não úteis. A envolvente é nomeadamente constituída por elementos tais como portas, janelas, pavimentos, cobertura e paredes que estabelecem essa separação. Para quantificar o balanço térmico do edifício é necessário conhecer as trocas de calor que se processam através da sua envolvente.

O princípio da conservação de energia postula que o balanço entre a quantidade de energia que entra num volume de controlo e a quantidade de energia que sai, num dado intervalo de tempo, tem de ser igual à quantidade de energia armazenada nesse intervalo.

Do balanço energético entre perdas ou ganhos de calor através da envolvente (por condução, convecção, radiação de onda longa) e os ganhos solares e internos resultantes da ocupação e dos equipamentos (com exceção dos da climatização) podem estimar-se os valores previsíveis para o consumo de energia ao longo de toda uma estação, de aquecimento (Inverno) e arrefecimento (Verão), para manter determinadas condições de conforto interior. As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram os processos de transmissão de calor do balanço térmico para as situações de Verão e Inverno.

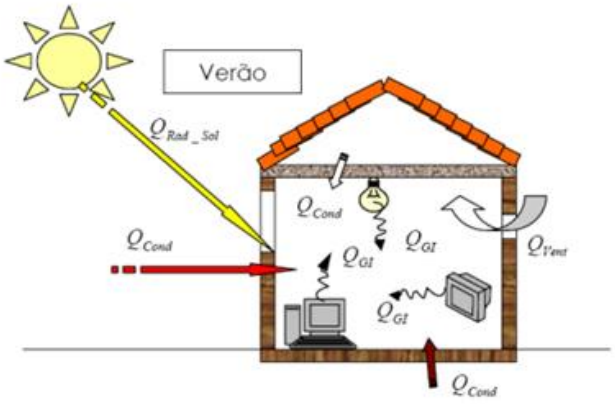


Figura 2.6 – Balanço térmico de edifícios na situação de Verão (Silva, 2006)

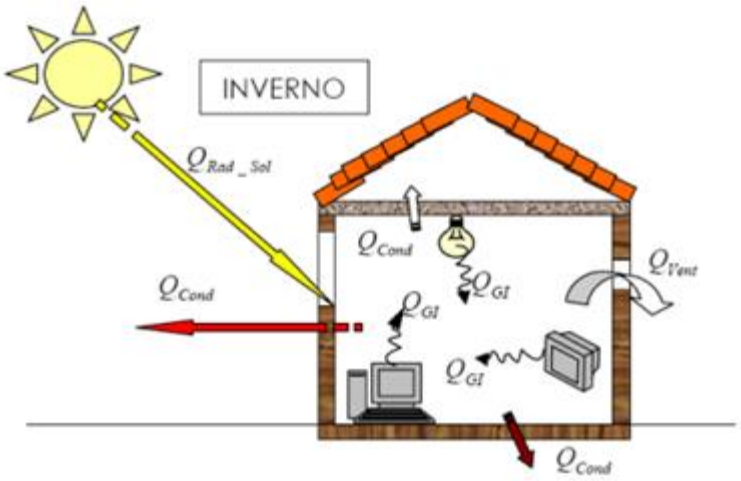


Figura 2.7 – Balanço térmico de edifícios na situação de Inverno (Silva, 2006)

Onde:

Q_{Cond}- Fluxo de calor por condução

Q_{Rad_Sol} – Ganhos térmicos devido à radiação solar

Q_{GI} – Ganhos internos

Q_{Vent} - Fluxo de calor por ventilação

2.2.1. Processos de transmissão de calor

O fenómeno de transmissão de calor dá-se na presença de dois corpos, ou pontos do mesmo corpo, com temperaturas diferentes. A energia é transferida do corpo mais quente para o mais frio, esta transmissão de calor faz-se no sentido do ponto ou elemento a que está associada maior energia para o ponto ou elemento com menor energia, a fim de estabelecer o equilíbrio térmico.

A transmissão de energia sob forma de calor processa-se de três formas distintas: condução, convecção e radiação. A condução e convecção requerem de um meio material para ocorrerem (sólido, fluido) e a radiação não necessita. De seguida, serão descritos estes fenómenos de transmissão de calor com mais pormenor.

2.2.1.1. Condução

A transmissão de calor por condução ocorre por meio do contacto de moléculas de elementos que se encontram a temperaturas diferentes, e está normalmente associada aos materiais em estado sólido, embora também esteja presente em fluidos. A transmissão de calor por condução corresponde à densidade do fluxo de calor que atravessa a espessura de um corpo.

O fluxo de calor por condução é transmitido da região com temperatura mais elevada para a região com temperatura mais baixa (Mimoso, 1987). A principal característica da condução é a transferência de energia sem simultânea transferência de matéria (Piedade, 1980).

Existem vários factores que influenciam a quantidade de calor que atravessa um certo elemento sólido, sendo função do material que o constitui, da espessura do elemento e do gradiente de temperatura. A condutibilidade térmica λ, é uma grandeza física que indica se o material é melhor ou pior condutor de calor. Define-se por condutibilidade térmica, a quantidade de calor que atravessa um cubo com um metro de aresta, submetido a um gradiente de temperatura de 1°C, durante um segundo.

A sua formulação matemática corresponde à lei de Fourier estabelecida em 1822 (Nussenzveig, 1981), a qual, para um elemento com espessura *e* (m) e área *S* (m^2) perpendicular ao fluido, submetido a uma diferença de temperatura uniforme nas faces - $(\Theta_1 - \Theta_2)$ em °C - e não variando no tempo, se traduz por:

$$\mathbf{Q} = \frac{\boldsymbol{\lambda S}(\Theta_1 - \Theta_2)}{\mathbf{e}} = \mathbf{K_p A}(\Theta_1 - \Theta_2) \ [\mathbf{W}] \qquad (2.3)$$

onde $\mathbf{K_p} = \boldsymbol{\lambda}/\mathbf{e}$ é a condutância térmica do elemento ($W/m^2°C$).

Pela fórmula anterior traduz-se que o fluxo de calor atravessa uma dada superfície S é proporcional ao produto da área atravessada, pela diferença de temperatura existente, e inversamente proporcional à espessura, sendo a condutibilidade térmica a constante de proporcionalidade.

Por uma questão de simplificação, considera-se que o fluxo de calor por condução que atravessa um dado elemento é unidirecional, embora na realidade, a condução possa ser um fenómeno tridimensional. No entanto, em térmica dos edifícios os elementos da envolvente geralmente têm a dimensão perpendicular ao fluxo de calor (comprimento) muito maior relativamente à dimensão paralela ao fluxo (espessura), logo a hipótese de fluxo unidimensional pode ser aplicada na maior parte dos casos. Esta simplificação não é válida em zonas de vigas e pilares, uma vez que, nestes elementos existe uma elevada concentração de trocas de calor, as designadas "pontes térmicas", nas quais o fluxo de calor é nitidamente bi-dimensional.

2.2.1.2. Convecção

A convecção é um mecanismo de transmissão de calor que ocorre num fluido em movimento sobre uma superfície sólida ou outro fluido, que se encontra a uma temperatura diferente. Em edificações existem duas formas distintas de transferência de calor por convecção: convecção ar-sólido e convecção ar-ar.

Na convecção ar-sólido, as trocas de calor dão-se entre o ar ambiente interior e exterior e as superfícies da envolvente interior e exterior, respectivamente. O fluxo de calor por convecção ar-sólido depende de vários factores como: a velocidade do fluido relativamente à superfície, o gradiente térmico entre a superfície e o fluido, o sentido do movimento do fluido e as características do material da superfície (Mimoso, 1987).

A equação (2.4) que descreve este fenómeno foi estabelecida por Newton em 1701 e demonstra que o fluxo de calor transmitido por convecção entre uma superfície e um fluido é proporcional à área da superfície considerada e à diferença de temperatura estabelecida:

$$\mathbf{Q = h_c A(\Theta_s - \Theta_f)\ [W]} \quad (2.4)$$

Onde,

h_c – Condutância térmica superficial por convecção (W/m^2 ^{o}C);

A – Área da superfície (m^2);

Θ_s – Temperatura da superfície (^{o}C);

Θ_f – Temperatura do fluido (^{o}C);

Q – Fluxo de calor por convecção (W).

Na convecção ar-ar, as trocas de calor são geradas entre massas de ar a diferentes temperaturas. Este fenómeno pode ocorrer naturalmente e processar-se através de aberturas na envolvente, que são controláveis pelos utilizadores (janelas e portas), ou não controláveis como as infiltrações nas juntas, ou então ser imposto por meios mecânicos. Nos edifícios, estas trocas podem verificar-se tanto, entre o ambiente exterior e o interior, assim como no ambiente interior entre volumes de ar com temperaturas diferentes.

$$\mathbf{Q = \rho C_p \dot{V}(\Theta_e - \Theta_i)\ [W]} \quad (2.5)$$

Onde,

ρ - Massa específica do fluido exterior ($\rho_{ar} \cong 1{,}2$ (kg/m^3);

C_p - Calor específico do fluido exterior ($C_{p\,ar} \cong 1000$ (J/kg^{o}C);

Θ_e - Temperatura exterior (^{o}C);

Θ_i - Temperatura interior (^{o}C);

$\dot{V}$ - Caudal da ventilação ($\dot{V} = R_{ph} \times V\,(W)$, onde R_{ph} é o número de renovação/horas (h^{-1}), V é o volume do espaço (m^3)).

2.2.1.3. Radiação

A transmissão de calor por radiação é de natureza diferente das anteriores uma vez que não necessita de um suporte físico para ocorrer. Todos os corpos emitem e recebem radiação e a quantidade de energia emitida é apenas função da sua temperatura absoluta e das propriedades da sua superfície. O mecanismo de transmissão é caracterizado pelo transporte de energia por ondas eletromagnéticas.

A lei que rege a quantidade de energia radiada por um corpo negro (corpo radiante puro) foi estabelecida experimentalmente por Stefan em 1879 e exposta teoricamente por Boltzman em 1884 (Mimoso, 1987) com a forma:

$$\mathbf{Q = \sigma A T^4\ [W]} \quad (2.6)$$

Sendo a energia radiada (Q, em W) diretamente proporcional à área do corpo exposta (A, em m^2) e à quarta potência da sua temperatura absoluta (T, em K). A constante de proporcionalidade é designada

por constante de Stefan-Boltzman e toma o valor $\sigma = 5{,}73 \times 10^{-8}$(W/m^{2}K^4). Para os materiais correntes, esta equação é afetada por um coeficiente de emissividadeε $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$, que mede a eficiência com que uma superfície emite radiação térmica:

$$\mathbf{Q = \varepsilon \sigma A T^4} \quad [\mathbf{W}] \tag{2.7}$$

Quando a radiação incide sobre um corpo subdivide-se em três parcelas: energia absorvida, transmitida e refletida. A energia absorvida é responsável pelo aumento da temperatura do corpo. A radiação incidente pode ser originada pelo sol – radiação solar (onda curta) ou causado por outro corpo (onda longa). Os fenómenos de radiação com pequeno comprimento de onda com interesse em edifícios estão associados à radiação solar, que atravessa o espaço e incide nos edifícios, quer do lado exterior, em paredes e coberturas, quer do lado interior, a partir dos envidraçados.

Esta radiação é transformada em energia térmica após ser absorvida pelas superfícies. Estas superfícies, em função do seu nível de temperatura, trocam radiação de comprimento de onda longa com as superfícies e objetos que se encontram no seu campo visual com diferentes temperaturas (Mimoso, 1987).

O fluxo de calor por radiação de onda longa pode ser determinado pela seguinte equação (2.8).

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{h_R}\ \mathbf{A}\ (\Theta_{\mathbf{i}} - \Theta_{\mathbf{e}}) \quad [\mathbf{W}] \tag{2.8}$$

O fenómeno de radiação solar será descrito com maior detalhe no sub-capítulo 2.2.3.

2.2.2. Coeficiente de transmissão térmica

A contabilização dos diversos fenómenos de transmissão de calor pode ser efetuado da seguinte forma:

$$\mathbf{Q = UA}(\Theta_{\mathbf{i}} - \Theta_{\mathbf{e}})\ [\mathbf{W}] \tag{2.9}$$

Em que:

Q – Fluxo de calor transferido entre o ambiente interior e exterior (W);

S – Área da superfície (m^2);

U – Coeficiente de transmissão de calor do elemento da envolvente (W/m^{2o}C);

Θ_i e Θ_e – Temperaturas do ar interior e exterior (°C).

Em regime permanente o fluxo de calor que atravessa o elemento da envolvente é constante (princípio da conservação da energia), sendo possível estabelecer as seguintes igualdades:

$$\mathbf{Q = UA}(\Theta_{\mathbf{i}} - \Theta_{\mathbf{e}}) = \mathbf{h_i A}(\Theta_{\mathbf{i}} - \Theta_{\mathbf{si}}) = {}^{\boldsymbol{\lambda}}\!/_{\mathbf{e}}\ \mathbf{A}(\Theta_{\mathbf{si}} - \Theta_{\mathbf{se}}) = \mathbf{h_e A}(\Theta_{\mathbf{se}} - \Theta_{\mathbf{e}})\ [\mathbf{W}] \tag{2.10}$$

Onde;

h_i – Condutância térmica superficial interior $(\mathrm{W/m^{2o}C})$;

h_i – Condutância térmica superficial exterior $(\mathrm{W/m^{2o}C})$.

O coeficiente de transmissão térmica (U) é a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária de um elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes interior e exterior (REH, 2013).

A partir da expressão (2.10) é possível determinar o valor do coeficiente de transmissão térmica ou do seu inverso, a resistência térmica:

$$\mathbf{U} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{R_{se}} + \mathbf{R_{si}} + \frac{\mathbf{e}}{\boldsymbol{\lambda}}} \ [\mathbf{m^2{}^oC/W}] \qquad (2.11)$$

Em que,

$R_{si} = {}^{1}/_{h_{si}}$ - Resistência térmica superficial interior $(m^2{}^oC/W)$;

$R_{se} = {}^{1}/_{h_{se}}$ - Resistência térmica superficial exterior $(m^2{}^oC/W)$;

$R_t = {}^{e}/_{\lambda}$ - Resistência térmica por condução $(m^2{}^oC/W)$.

As condutâncias térmicas superficiais h_{si} e h_{se} agregam os fenómenos de convenção e radiação. Os valores das condutibilidades térmicas λ são características intrínsecas dos materiais (Piedade, Moret e Roriz, 2003).

2.2.3 Ganhos solares e factor solar

No comportamento térmico de edifícios é fundamental considerar a radiação solar uma vez que não só contribui bastante para os ganhos térmicos nas edificações, mas também é a principal fonte de luz natural (Lanham, 2004).

Estes ganhos são muito benéficos no Inverno para o aquecimento, mas durante o Verão devem ser limitados e controlados por um sistema de protecção opaca de sombreamento sobre a janela, de modo a evitar o sobreaquecimento (Lanham, 2004).

A envolvente do edifício apresenta zonas opacas, onde ocorre absorção e reflexão da radiação e zonas translúcidas, como os envidraçados, para além desta componente existe a transmissão da radiação, sendo uma das maiores responsáveis pelos ganhos solares. Os elementos mais sensíveis à radiação são os envidraçados devido à sua elevada transmitância e fraca resistência térmica. A radiação de onda curta atravessa facilmente o vidro fornecendo energia aos elementos existentes no espaço, os quais, absorvem e acumulam uma grande parte dessa energia.

Os restantes elementos, nomeadamente os opacos, restringem a passagem de energia sobre a forma de radiação, permitindo apenas a absorção da radiação e não a sua transmissão (Lanham, 2004).

O aproveitamento da radiação solar passa pela atitude dos ocupantes que regulam a entrada de radiação na habitação, controlando a activação ou ocultação das proteções solares. Os mecanismos de sombreamento externos, como estores, portadas ou toldos e os mecanismos de sombreamento interiores, como cortinas e cortinados, são elementos à disposição dos utilizadores para o controlo dos ganhos por radiação solar. Nos mecanismos de sombreamento externos, a radiação solar absorvida é

dissipada directamente para o exterior, constituindo portanto um sistema mais eficiente (Lanham, 2004). A regulação das proteções permite controlar a radiação solar, dando um contributo importante para a climatização do edifício, evitando excessivo sobre-aquecimento dos espaços durante o Verão.

De toda a radiação total incidente num envidraçado, uma parte é transmitida instantaneamente para o interior, outra é refletida para o exterior e uma terceira parte é absorvida pelo próprio vidro. Da radiação absorvida, que representa a energia acumulada no vidro, há ainda uma parcela que vai ser emitida para o interior e uma outra para o exterior, devido aos fenómenos de convecção e radiação.

Para definir a totalidade da radiação solar que é transmitida para o interior dos compartimentos recorre-se ao parâmetro designado por factor solar do vidro ($g_{\perp}$). Este parâmetro considera como ganhos de calor pela radiação solar a soma de duas parcelas, a radiação transmitida diretamente (T) e a radiação absorvida e reenviada para o interior (S_i). O factor solar de um envidraçado representa assim o quociente entre a energia solar transmitida para o interior, através do envidraçado, e a energia da radiação solar total incidente (RCCTE - DL 80/2006)

A equação 2.12 traduz exatamente essa definição:

$$g_{\perp} = \frac{\textbf{Ganho de calor solar através do vidro}}{\textbf{Radiação incidente}} = \frac{T + S_i}{l} \qquad (2.12)$$

Onde,

$g_{\perp}$ - Factor solar;

l – Radiação solar incidente;

T – Transmissão energética global;

S_i – Fração da energia absorvida e emitida para o interior.

O factor solar indica a fração da energia solar que efetivamente atravessa o envidraçado e é transmitida para o interior do edifício. Assim, quanto menor for o factor solar do vidro, menor será a quantidade energia através deste.

O $g_{\perp}$ é condicionado pelo ângulo de incidência solar, condições de convecção natural pelo exterior, velocidade do vento e espessura do vidro. No mercado é comum encontrar factores solares para os vidros que variam entre 0,10 (vidro duplo de cor azul com controlo solar) e os 0,90 (vidro simples claro) (Ramalheira, 2005).

2.2.4. Principais factores que afetam o comportamento térmico dos edifícios

Conforme foi mencionado anteriormente, existem factores que influenciam diretamente o desempenho térmico dos edifícios. No entanto, alguns deles merecem maior relevância devido ao seu maior contributo no conforto térmico como o isolamento térmico, a inércia térmica e a ventilação.

2.2.4.1. Isolamento Térmico

O principal objetivo de utilizar um isolamento térmico é constituir uma barreira à transmissão de calor através do aumento da resistência térmica dos elementos da envolvente do edifício, o que implica a redução das trocas de calor e consequentemente a redução das necessidades energéticas. No Verão, as necessidades energéticas de arrefecimento correspondem à quantidade de calor necessário retirar para satisfazer os critérios de conforto térmico (θ_i, Conforto Verão 25 °C). No Inverno, as necessidades energéticas de aquecimento corresponde à quantidade de calor necessário fornecer de modo a respeitar os critérios de conforto térmico (θ_i, conforto Inverno 20 °C).

Desta forma e particularmente na estação de Inverno, quanto mais fácil for a passagem do calor através dos elementos da envolvente, ou seja, quanto menor for o seu grau de isolamento térmico, maior será a quantidade de calor a fornecer, e consequentemente maior será o consumo energético para manter a temperatura interior dentro do intervalo de temperatura de conforto. Por esta razão, é muitas vezes necessário utilizar materiais de isolamento térmico nas soluções construtivas caracterizados por condutibilidades térmicas inferiores a 0,065 W/m°C (Piedade, Moret e Roriz, 2003).

As pontes térmicas nos elementos estruturais são bastante menos importantes nos betões com agregados leves, demonstrando benefícios em termos económicos e energéticos. Nas soluções construtivas com estes betões, é possível reduzir a quantidade de isolamento térmico adicional nos elementos estruturais ou, até mesmo, evitar a sua utilização.

O isolamento térmico pode ser aplicado de formas diferentes: no caso das paredes, o isolamento térmico aplicado no exterior apresenta vantagens como a redução de pontes térmicas, manutenção da área útil, protecção das fachadas e aumento da inércia térmica; outra opção é aplicação de isolamento térmico na caixa-de-ar em paredes duplas, esta apresenta a vantagem do vapor de água condensar na caixa-de-ar e desde modo não afetar os paramentos interiores e exteriores. Podem ser utilizados vários tipos de materiais isolantes, tanto nas coberturas como nas paredes, desde aglomerados de cortiça, lãs minerais, poliestireno expandido e extrudido, entre outros, optando-se pelo mais adequado para solução construtiva adoptada e a sua compatibilidade com os materiais em contacto. Nos pavimentos deve-se ter maior atenção na sua solução, sobretudo nos pavimentos em contacto com solo.

2.2.4.2. Inércia Térmica

A inércia térmica traduz na capacidade do elemento de armazenar calor e conservá-lo por um longo período de tempo. A inércia térmica está relacionada com a massa do elemento, ou seja, quanto maior a massa, maior será a inércia térmica.

Num edifício em que os elementos da envolvente tenham uma elevada inércia térmica, o fluxo de calor atravessará a envolvente num processo lento, logo os ganhos e perdas serão mais lentos. Por exemplo, durante um dado período do dia em que a temperatura exterior seja superior à temperatura interior, o fluxo de calor atingirá o interior ao fim de algum tempo devido ao armazenamento de calor por parte da envolvente, o que implicará uma subida lenta da temperatura (Piedade, Moret e Roriz, 2003). Por outro

lado, durante a noite, os elementos da envolvente libertará o calor armazenado durante o dia, o que implicará uma descida lenta da temperatura. Desde modo, a inércia térmica é um factor importante para o balanço térmico dos edifícios.

Outros factores que influenciam a inércia térmica são: a difusibilidade térmica e o posicionamento do isolamento térmico. A difusibilidade térmica representa a quantidade de energia transferida através de um material em relação à quantidade de energia armazenada. Materiais com baixa difusibilidade térmica apresentam boa capacidade de armazenamento de energia.

O isolamento térmico colocado pelo exterior para aumentar a inércia térmica da solução, pode conduzir a um comportamento mais vantajoso do ponto de vista do conforto e da economia de energia, uma vez que amortece a onda de calor nos períodos em que é mais intensa e dispersa os seus picos para as horas de menor calor.

2.2.4.3. Ventilação

A ventilação está relacionada com o fenómeno de transmissão de calor convecção ar-ar. A ventilação pode ser natural com aberturas próprias para o efeito ou forçada mecanicamente. As principais funções da ventilação baseiam-se no conforto térmico, prevenção do aparecimento de condensações e manutenção da qualidade do ar interior.

No interior dos edifícios, ao fim de algum tempo, o ar perde qualidade, logo o ar poluído deve ser renovado por ar puro. A renovação do ar pode contribuir para o conforto térmico, permitindo alcançar com menor consumo de energia a temperatura de conforto no Verão.

Por outro lado a ventilação é importante para evitar condensações e diminuir os níveis de humidade, principalmente nas casas de banho e cozinhas por serem locais com elevada produção de vapor.

2.2.5. Regulamentação atual

A primeira regulamentação térmica portuguesa surgiu em 1990 com a aprovação do Decreto-Lei Nº 40/90 de 6 de Fevereiro (RCCTE, 1990), que fez entrar em vigor o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), tendo sido revista recentemente no âmbito da nova diretiva europeia para a eficiência energética dos edifícios, publicada em 2006 (RCTTE, 2006).

Em 2006, surgem assim o Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de Abril, e o Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 de Abril, que aprovam, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006) e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE, 2006).

Relativamente a versão de 1990, o RCCTE (2006) considera de sistemas de climatização, impondo limites aos consumos destes equipamentos e a obrigatoriedade, por parte dos projetistas de considerarem sistemas construtivos que permitam assegurar as taxas de renovação de ar adequadas (número de renovação de ar mínimos de 0,6 por hora). Outras mudanças foram: o aumento dos

requisitos e novos dados climáticos, nomeadamente os graus-dia de aquecimento, que em vez de considerar uma temperatura de base de 18ºC da versão antiga, passou a adoptar uma temperatura base de 20ºC.

O RCCTE (2006) também introduziu o cálculo de dois novos parâmetros: a necessidade de energia para a preparação de Águas Quentes Sanitárias (N_{ac}) e Necessidades Globais de Energia Primária (Ntc). O último cálculo faz a conversão da energia necessária em unidades equivalentes de petróleo que constitui uma medida do impacto ambiental das diferentes soluções (Roussado, 2008).

O actual regulamento foi publicado em 2013 (REH, 2013) com o objetivo de implementar e reforçar as boas práticas na construção civil, com um aumento do conforto das habitações e a redução das emissões de gases com efeito estufa (GEE) associados à sua climatização.

Mantém a exigência de verificação das soluções térmicas da envolvente para as estações de aquecimento e de arrefecimento, tal como ocorria no regulamento anterior, passando o número de renovação de ar mínimos a ser de 0,4 renovações por hora. A temperatura de conforto de Verão manteve-se no REH (2013) de 25ºC, ao passo que a temperatura de referência de Inverno passou a ser de 18ºC (no RCCTE (2006) essa temperatura era de 20ºC).

Os ganhos solares representam, efetivamente, um dos cálculos mais complexos do actual REH (2013) e do anterior RCCTE (2006), facto que está relacionado com o elevado número de factores multiplicativos para a sua determinação. Entre estes, encontram-se os factores de orientação, factor solar do vidro, o factor de obstrução, a fração envidraçada e o factor de seletividade angular. São considerados os ganhos solares, não só através da envolvente envidraçada (quer de Inverno, quer de Verão), mas também através da envolvente opaca na estação de Verão.

Para efeitos de balanço térmico são considerados satisfatórios caudais entre 0.4 e 0.6 h^{-1} e é conferida aos técnicos a possibilidade de implementarem várias estratégias de ventilação, como a admissão de ar por condutas, com grelhas na envolvente e a ventilação por meios naturais ou mecânicos, incentivando-se de forma proporcional a utilização de janelas de baixa permeabilidade ao ar e de caixas de estore bem vedadas. Com esta nova abordagem são identificados os principais parâmetros da ventilação; por exemplo, a dimensão das aberturas de ventilação.

A estimativa dos caudais de ventilação natural e das infiltrações de ar é complexa e governada por fenómenos que são regidos por equações não lineares o que dificulta a simplificação e a apresentação de valores em tabelas para as múltiplas soluções disponíveis. Existe margem para melhorar a estimativa de Rph, nomeadamente para ser considerada uma gama de velocidades do vento para valorizar melhor os sistemas com caudais de ar mais independentes da velocidade do vento. Esta avaliação, atualmente pode ser realizada de forma complementar na ferramenta de cálculo da ventilação.

2.2.6. Programas de simulação energética

O *EnergyPlus* é, tal como outros programas nomeadamente o ESP-r, o DOE e o TRNSYS, um programa de simulação dinâmica do desempenho térmico de edifícios que permite calcular a carga térmica de um edifício tendo como base nas especificações definidas pelo utilizador, permitindo obter a quantidade de energia necessária para que a temperatura ambiente interior se mantenha próxima das temperaturas de conforto pré-estabelecidos.

De um modo geral, o *EnergyPlus* permite estimar, entre outros, as temperaturas interiores (ambiente e superficiais), as perdas e ganhos de calor, o consumo de energia e os níveis de iluminação. Para além das funções descritas anteriormente, o *EnergyPlus* é capaz de simular o funcionamento de diferentes sistemas de climatização (*Energy Plus* Manual, 2004).

O programa foi criado pelo *US Department of Energy* (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América) na linguagem Fortran 90 e desenvolvido a partir dos programas BLAST e DOE-2.

As principais vantagens do programa são: capacidade de estabelecer *links* com outros programas de simulação, fazer simulações em intervalos de tempo definidos pelo utilizador e apresentar resultados com uma frequência de uma hora (ou de 15 minutos). O programa tem uma interface simples e de fácil utilização. O uso do programa *EnergyPlus* em edifícios e a sua comparação com resultados experimentais tem vindo a mostrar a adequação do seu algoritmo à realidade observada.

2.3. COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS COM SOLUÇÕES EM BETÃO LEVE

2.3.1. Considerações gerais

O conhecimento das propriedades térmicas dos materiais é essencial para a engenharia civil e para a escolha criteriosa dos materiais para funções específicas. A crescente tendência do sector da construção é reduzir o custo de produção e instalação, e ao mesmo tempo satisfazer maiores padrões de exigência funcional, nomeadamente ao nível do isolamento térmico e acústico. Assim, é necessário procurar novas soluções alternativas que sejam potencialmente mais atrativas (Arsenovic, Lalic e Radojevic, 2010).

A aplicação de betão leve (BEAL) em edifícios permite obter soluções mais leves e esbeltas, tornando energeticamente mais eficientes. A aplicação deste tipo de betão permite reduzir a dimensão ou a carga sobre as fundações e a obtém de soluções construtivas mais esbeltas. Apesar do betão leve ter maiores custos energéticos na fabricação de agregados artificiais e de poder ter maiores exigências de volume de ligante, pode contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Os edifícios com soluções em betão leve apresentam várias vantagens. Destas destacam-se as principais (FIP, 1983), (Holm e Bremner, 2000):

- Maior resistência à ação sísmica por diminuição da massa e aumento de dissipação de energia (menor rigidez e maior capacidade de deformação dos BEAL), logo maior amortecimento das ações dinâmicas ou vibrações;
- Maior capacidade de isolamento térmico e menor suscetibilidade à fendilhação por restrição de deformações térmicas ou diferenciais;
- Maior resistência à ação do fogo,
- Menor susceptibilidade a assentamentos diferenciais devido ao menor módulo de elasticidade.
- Melhoria das características de isolamento térmico dos edifícios.

Consoante a finalidade e as propriedades pretendidas para os betões de agregados leves, a sua função principal pode ser estrutural, de isolamento térmico ou simplesmente de enchimento. Conforme já mencionado no capítulo 2.1.2 Normalização.

2.3.2. Aplicação de betão leve em elementos não estruturais

A utilização do betão leve não estrutural tem abrangido diversos domínios de aplicação, desde soluções para alvenaria, de enchimento com fins térmicos, regularização de pendentes, painéis de enchimento e isolamento de cobertura, pavimentos e pisos.

A produção de blocos de alvenaria e painéis pré-fabricados autoportantes com função de isolamento térmico são as aplicações mais correntes. Atualmente no sector da construção tem-se assistido ao aumento dos requisitos de qualidade dos produtos de construção particularmente em termos das suas propriedades térmicas (Arsenovic, Lalic e Radojevic, 2010).

Para a mesma resistência, os blocos de alvenaria de betão leve são menos pesados do que as soluções tradicionais de alvenaria de tijolo, reduzindo a inércia e o custo de laboração dos edifícios (Roberts, 1997).

Os blocos aplicados na envolvente de edifícios são produtos nos quais o desempenho térmico, acústico e de estanquidade à água é preponderante. O betão leve, dadas as suas características garante um bom comportamento aos produtos que o incorporam. Estes blocos são multi-câmara ou maciços e possuem normalmente elevados desempenhos termo-higrométricos. Têm normalmente espessuras acima dos 25 cm e podem ter também funções estruturais (Lourenço e Sousa, 2002).

Os blocos aplicados na compartimentação interior de edifícios possuem espessuras que variam entre 8 e 15cm, não têm qualquer função estrutural, e distinguem-se sobretudo pela sua leveza. É exigido um bom desempenho no que respeita ao isolamento acústico, podendo dispensar o uso adicional de isolamento nas paredes (Lourenço e Sousa, 2002).

A produção de betão com diatomite permite obter um betão leve de baixa resistência com boas propriedades de isolamento térmico. A diaomite é altamente absorvente, leve e de natureza fluida. Devido a estas propriedades únicas, a produção de blocos de betão leve com diatomite permite soluções de elevado isolamento térmico e reduzido peso próprio (Ünal, Uyguniglu e Yildiz, 2005).

Atualmente, a aplicação mais comum do betão leve é em soluções não estruturais, sendo cada vez mais utilizado na reabilitação de estruturas existentes, nomeadamente pavimentos, devido às suas características de leveza, boa resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico.

2.3.3. Aplicação de betão leve em elementos estruturais

Os benefícios do betão estrutural de agregados leves tendem a ser mais significativo para estruturas em soluções, onde o peso próprio é condicionante e a capacidade do solo de fundação é relativamente reduzida. O betão leve possibilita a construção em solos com menor capacidade de suporte ou exigindo fundações menos complexas e mais económicas (Clarker, 1993).

A construção de edifícios altos tem uma grande tradição na aplicação de betão leve. Esta é conhecida pelas excelentes características isolantes (acústicas e térmicas) e uma melhor resistência ao fogo comparativamente ao betão convencional. O menor valor do coeficiente de condutibilidade e de dilatação térmica e o melhor comportamento dos agregados leves a altas temperaturas, torna a utilização do betão leve potencialmente atrativa nas situações em que é relevante a resistência ao fogo. Estas propriedades do betão leve valorizam as edificações relativamente ao balanço energético. No Reino Unido durante a década de 90 do século passado, 80% da utilização do betão de agregado leve era aplicado, parcialmente ou integralmente, em lajes (Clarker, 1993). As lajes de betão leve apresentam as seguintes vantagens:

- Redução ou eliminação das necessidades de protecção adicional ao fogo;
- Aumento da durabilidade do pavimento;
- Redução do peso global do edifício e diminuição das acções sobre os elementos verticais e fundações

Uma das principais vantagens do sistema é o maior desempenho ao fogo, resultando na protecção parcial das vigas de apoio por parte do betão. Resultados teóricos e experimentais indicam que duas horas de resistência ao fogo podem ser obtidas sem a necessidade de protecção adicional.

A redução do peso próprio das estruturas, a necessidade de menor quantidade de armaduras de pré-esforços e ordinária, a maior resistência de ação sísmica, o maior tempo de exposição ao fogo, o aligeiramento dos elementos metálicos em estruturas mistas aço-BEAL e a sua notável durabilidade (baixa permeabilidade e resistência a corrosão e à ação gelo-degelo) traduzem o enorme potencial do uso de betão de agregados leve na concepção de estruturas.

Os betões leves por apresentarem uma elevada redução no módulo de elasticidade pode condicionar a sua utilização. A menor rigidez destes betões pode implicar um aumento das secções dos elementos estruturais, quando a deformação é condicionante. Verifica-se que, quanto menor é a massa volúmica dos agregados, maior é o aumento da altura exigida para os elementos estruturais, mas maior é a redução no peso global.

Conforme o ITE 50, verifica-se que a utilização de BEAL pode conduzir a soluções construtivas com resistências térmicas 2,5 vezes superiores e coeficiente de transmissão térmica de aproximadamente

metade, face aos betões convencionais BAN ($U_{BEAL} \cong 0{,}45 - 0{,}60\, U_{BAN}$). Isto demonstra a maior potencialidade dos betões leves no cumprimento das exigências funcionais de isolamento térmico.

De forma indicativa, uma parede de betão leve com 0,4 m de espessura corresponde aproximadamente a um parede de betão com 1 m de espessura ou uma parede simples de tijolo furado com 0,2-0,24 m de espessura (ITE50, 2006), em termos de capacidade de isolamento térmico. Tendo em consideração soluções construtivas correntes de adequado desempenho, por exemplo uma parede dupla de alvenaria composta por dois panos de tijolo (0,11 m e 0,15 m) e uma placa de poliestireno extrudido (XPS) de 40 mm de espessura, com $U_{dupla} \cong 0{,}51\ W/m^2{}^{\circ}\mathrm{C}$, apresenta uma capacidade de isolamento equivalente à de uma parede de BEAL com 1,2 m de espessura ou uma parede normal com 3 m de espessura (ITE50, 2006).

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, procura-se apresentar as diferentes fases da campanha experimental, que incluem as etapas de formulação, produção e realização dos ensaios realizados aos agregados e aos betões produzidos. Deste modo, para além da referência às normas utilizadas, é realizada uma descrição sucinta dos vários procedimentos experimentais. Apresentar-se-ão ainda os resultados obtidos nos vários ensaios de caracterização realizados durante a campanha experimental.

Em relação aos constituintes do betão, foram apenas caracterizados os agregados utilizados. As características do cimento, foram definidas tendo em consideração os dados do fornecedor. Houve a preocupação de adotar o cimento proveniente do mesmo lote de fabrico para todas as misturas.

Esta campanha experimental pretende avaliar o desempenho térmico e mecânico de betões estruturais de agregados leves com diferentes composições. Para tal, foram analisados os 4 tipos de betão leve e 3 tipos de betão normal, referidos em seguida:

- Betão de massa volúmica normal com relação água/cimento 0,60 (BN1);
- Betão de massa volúmica normal com relação água/cimento 0,45 (BN 2);
- Betão de massa volúmica normal com relação água/cimento 0,35 (BN 3);
- Betão com agregados grossos leves e areia natural, de relação água/cimento 0,60 (BL 1);
- Betão com agregados grossos leves e areia natural, de relação água/cimento 0,45 (BL 2);
- Betão com agregados grossos leves e areia natural, de relação água/cimento 0,35 (BL 3);
- Betão com agregados grossos leves e areia leve de relação água/cimento 0,35 (BL 4).

As composições referidas foram definidas de modo a abranger a gama mais corrente de betões estruturais de agregados leves, tendo em conta soluções de moderada a elevada resistência para classes de massas volúmicas entre D1,6 e D2,0. Foi também produzido um betão com areias leves de modo a se atingirem maiores reduções de massa volúmica e de condutibilidade térmica sem grande prejuízo das suas características mecânicas. Finalmente, foram ainda produzidos betões de referência com agregados calcários de modo a aferir o comportamento relativo dos diferentes tipos de betão leve face a soluções de massa volúmica normal.

Para cada tipo de betão, foram produzidos os seguintes provetes:

- 11 provetes cúbicos de 15 cm de aresta para ensaiar à compressão aos 7 dias (3 provetes) e 28 dias (8 provetes) de idade;
- 3 provetes cilíndricos de 15 cm de diâmetro e30 cm de comprimento para ensaiar à compressão diametral os 28 dias de idade;
- 2 provetes cilíndricos de 15 cm de diâmetro e30 cm de comprimento para a determinação do módulo de elasticidade nos betões com a/c=045;
- 1 provete cúbico de 10 cm de aresta para a realização dos ensaios de condutibilidade térmica.

Neste capítulo, são também apresentados os cálculos referentes à formulação dos diferentes betões. Toda a campanha experimental foi realizada no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georecursos do Instituto Superior Técnico (IST).

3.2. PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A Campanha experimental foi desenvolvida em duas fases distintas.

1ª Fase

Na primeira fase procedeu-se à caracterização dos agregados a incorporar nos betões produzidos recorrendo-se aos seguintes ensaios: Análise granulométrica (NP EN 933-1 e NP EN 933-2); Baridade (NP EN 1097-3); Massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097-6). Os agregados leves foram caracterizados de acordo com a EN 13015-1 (Agregados leves para betão).

2ª Fase

A segunda fase envolveu a produção dos provetes a serem ensaiados, bem como a realização dos ensaios de caracterização do betão no estado fresco e endurecido, nomeadamente o ensaio de abaixamento (EN 12350-3), massa volúmica fresca (EN 12350-4), resistência à compressão (NP EN 12390-3), resistência a tracção por compressão diametral (NP EN 12390-6) e o módulo de elasticidade (E 397).

Foi anda determinado o coeficiente de condutibilidade térmica dos betões a partir do equipamento ISOMET 2114, conforme referido em 3.8.

3.3. MATERIAIS

Na presente campanha experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- cimento Tipo I 52,5;
- agregados grossos de massa volúmica normal, britas calcárias de diferentes granulometria, designadas de brita 1 e bago de arroz utilizados para a produção de betões de referência;
- agregados grossos leves de argila expandida designados por Leca HD para a produção de betões leves;
- agregados finos leves de argila expandida designados por Leca XS para a produção de betões com agregados grossos e finos leves;
- duas areias naturais siliciosas, correspondentes a uma areia fina 0/2 e a uma areia grossa 0/4 para a produção de betões de referência e leves com areias naturais;
- o superplastificante utilizado foi o Sky 548 da BASF.

No ponto em seguida apresentam-se os ensaios e resultados obtidos no estudo de caracterização dos agregados utilizados.

3.3.1. Ensaios de caracterização dos agregados

Na presente campanha foram utilizados dois tipos de agregados grossos de massa volúmica normal (britas calcárias de diferentes granulometria, designadas de brita 1 e bago de arroz) e dois tipos de agregado leve de argila expandida (agregado grosso designado de Leca HD e areia leve designada de Leca XS). Foram ainda utilizados duas areias naturais siliciosas, correspondente a uma areia fina 0/2 e uma areia grossa 0/4. As principais características destes agregados são apresentadas nos pontos em seguida.

3.3.1.1. Análise granulométrica

3.3.1.1.1. Objectivo e norma do ensaio

Foi adoptado o procedimento de ensaio especificado na norma NP EN 933-1 (2000) "Ensaios das propriedades geométricas *dos* agregados – Parte 1: Análise granulométrica Método de peneiração". Associada a esta norma, encontra-se a NP EN 933-2 (1999), onde são especificadas as dimensões nominais das aberturas, formato da tela de arame e chapas perfuradas dos peneiros de ensaio.

A análise granulométrica é fundamental na formulação e maximização da compacidade granular de um betão, e tem por objectivo quantificar estatisticamente as diferentes dimensões e correspondentes fracções das partículas constituintes de cada um dos tipos de agregados a utilizar.

3.3.1.1.2. Procedimento de ensaio

A norma NP EN 933-1 especifica a massa de amostra mínima a utilizar no ensaio em função da máxima dimensão do agregado, pelo que, após a secagem, o provete deverá possuir massa superior ao indicado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Massa mínima dos provetes de ensaio para realização da análise granulométrica

Dimensão máxima $D_{máx}$ (mm)	**Massa mínima do provete (kg)**
31.5	5
16	2
8	1

Após a preparação da amostra, adotou-se o seguinte procedimento:

- Seca-se a amostra em estufa ventilada 105± 5°C até se atingir massa constante e regista-se o seu valor;
- De seguida, coloca-se directamente o provete de ensaio na coluna de peneiros, corretamente ordenados, com fundo e tampa, e procede-se à peneiração mecânica (Figura 3.1);

- Retira-se cada peneiro individualmente e certifica-se, através de agitação manual com a tampa e fundo, que não existe perda de material;
- O processo de peneiração termina quando, após 1 minuto de peneiração manual, a massa do material retido não sofre alteração superior 1,0%;
- Seguidamente, pesa-se o material retido no peneiro de maior dimensão nominal e regista-se a sua massa;
- Repete-se o procedimento anterior para os restantes peneiros, registando-se a massa das diferentes frações;
- Por fim, pesa-se o material retido no fundo (resíduo).

Figura 3.1 - - Agitador de peneiros utilizado na análise granulométrica

3.3.1.1.3. Resultados do ensaio

A percentagem de material retido em cada peneiro é determinado de acordo com a seguinte expressão:

$$\mathrm{V}_i(\%) = \frac{\mathrm{M}_1}{\mathrm{M}_2} \times 100 \qquad (3.1)$$

Onde,

V_i - Percentagem de material retido em cada peneiro;

M_1 - Massa da amostra seca;

M_2 - Massa de material retido em cada peneiro.

A percentagem de material passado acumulado corresponde à soma entre a percentagem do material retido no peneiro em causa e as do material retido em todos os peneiros de abertura superior, subtraindo-se de 100 ao valor assim obtido. Em seguida apresentam-se os resultados obtidos para cada tipo de agregado (areia leve, agregado grosso leve, areia fina, areia grossa, bago de arroz e brita 1).

Na Figura 3.2, apresenta-se a curva granulométrica dos agregados, em escala logarítmica, sendo que as abcissas representam a dimensão das partículas e as ordenadas a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros.

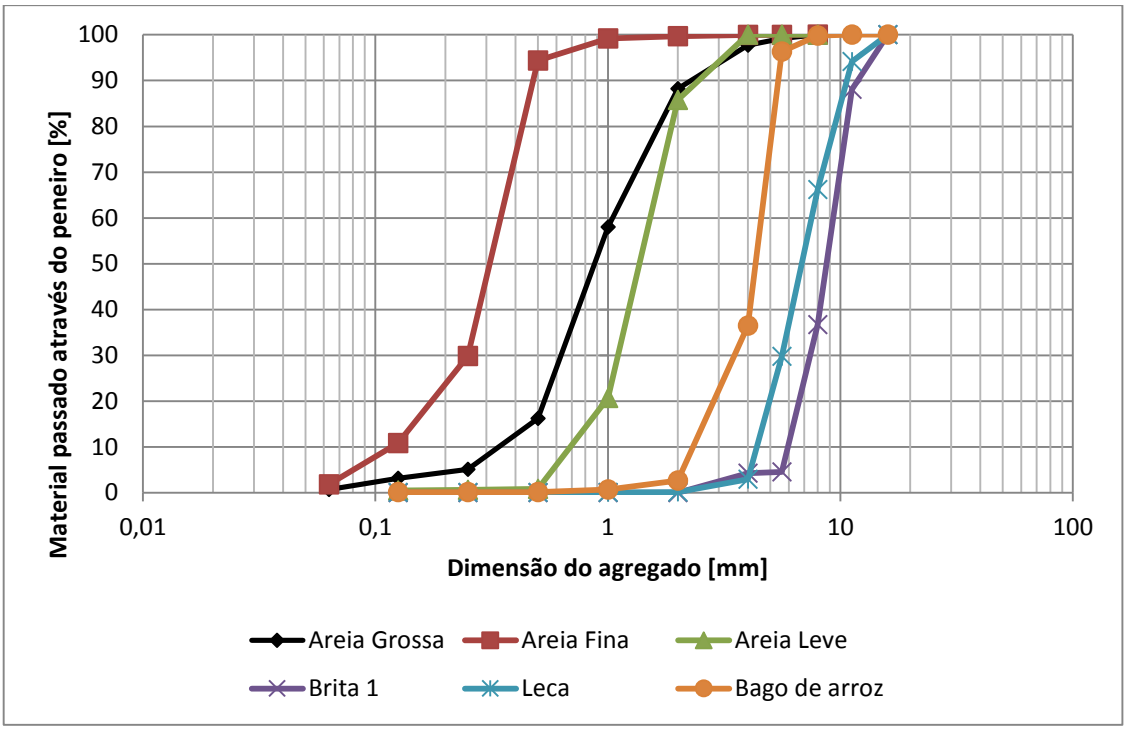


Figura 3. 2 - Curvas granulométricas dos agregados

A análise granulométrica dos agregados, bem como o módulo de finura, são apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Análise granulométrica dos agregados

Areia leve Massa da amostra=1028,4 g			Areia fina Massa da amostra=1003 g		Areia grossa Massa da amostra = 1007,4 g		Bago de Arroz Massa da amostra= 1004,5 g		Leca Massa da amostra= 1008,4 g		Brita 1 Massa da amostra= 1005,4 g	
Peneiros	**Resíduo acumulado**		**Resíduo acumulado**		**Resíduo acumulado**		**Resíduo acumulado**		**Resíduo acumulado**		**Resíduo acumulado**	
	Passado	**Retido**	**Passado**	**Passado**	**Retido**	**Retido**	**Passado**	**Retido**	**Passado**	**Retido**	**Passado**	**Retido**
	[%]	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**
16,0							100,00	0	100,00	0	100,00	0
11.2							100,00	0,00	94,12	5,88	88,04	11,96
8,0	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	99,84	0,16	66,21	33,79	36,73	63,27
5,6	100,00	0,00	99,98	0,02	99,16	0,84	96,31	3,69	29,83	70,17	4,57	95,43
4,0	99,99	0,01	99,97	0,03	97,72	2,28	36,49	63,51	2,98	97,02	4,32	95,68
2,0	85,69	14,31	99,64	0,36	88,24	11,76	2,72	97,28	0,15	99,85	0,06	99,94
1,0	20,34	79,66	99,21	0,79	58,00	42,00	0,74	99,26	0,07	99,93	0,03	99,97
0,5	0,39	99,61	94,33	5,67	16,22	83,78	0,14	99,86	0,07	99,93	0,03	99,97
0,250	0,19	99,81	29,89	70,11	5,12	94,88	0,14	99,86	0,07	99,93	0,03	99,97
0,125	0,03	99,97	20,85	79,15	3,15	96,85	0,14	99,86	0,07	99,93	0,03	99,97
0,063	0,01	99,99	1,82	98,18	0,72	99,28						
Refugos			1,350	98,650	0,715	99,285						
Módulo de Finura		**3,93**		**1,56**		**3,32**		**5,60**		**6,3**		**5,6**

3.3.1.2. Massa volúmica, absorção de água e teor de Humidade

3.3.1.2.1. Objectivo e norma do ensaio

Foi utilizada a metodologia de ensaio descrita pela norma NP EN 1097-6 (2003) "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6 Determinação da massa volúmica e da absorção de água."

Em condições ideais, os agregados deviam ser incorporados na mistura saturados com superfície seca. No entanto, na prática é difícil garantir essas condições. Assim é fundamental quantificar o teor de humidade e a absorção de água nos agregados, de modo a realizar as devidas correções na quantidade de total de água de amassadura.

3.3.1.2.2. Procedimento de ensaio para agregados finos

De acordo com a norma EN 1097-6, foi adoptado o seguinte procedimento na realização dos ensaios:

- Seleciona-se uma amostra com cerca de 1 kg, passa-se a amostra pelo peneiro de 4 mm (rejeitando qualquer material que fique retido) e pelo peneiro de 0.063 mm e coloca-se na estufa a secar até se atingir massa constante.
- Imerge-se a amostra no picnómetro com água e elimina-se o ar ocluído;
- Faz-se transbordar o picnómetro por adição de água e coloca-se a tampa sem deixar ar dentro do mesmo;
- Seca-se o picnómetro por fora; regista-se a massa do conjunto (picnómetro, provete de ensaio e água) como M_2;
- Espalha-se o provete molhado numa camada uniforme sobre a base de um tabuleiro; expõe-se o agregado a uma corrente de ar morno, de modo a evaporar a humidade superficial; remexe-se o provete em intervalos frequentes de modo a assegurar uma secagem homogénea, até que não seja visível humidade superficial e as partículas do agregado não adiram umas as outras; deixa-se arrefecer o provete;
- Pesa-se o provete saturado com a superfície seca e regista-se o valor como M_1;
- Seca-se o provete de ensaio em estufa a 105-110 °C até massa constante;
- Pesa-se o provete de ensaio seco e regista-se o valor como M_4.

3.3.1.2.3. Procedimento de ensaio para agregados grossos

De acordo com a norma EN 1097-6, a preparação do provete passa por recolher uma amostra com cerca de 1 kg de massa (de acordo com o Quadro 3.1), constituída por partículas que se encontrem no intervalo entre D_{max} e 4 mm.

A norma sugere o seguinte procedimento:

- Começa-se por lavar a amostra, de modo a retirar partículas e poeiras indesejáveis e coloca-se a amostra num picnómetro, de seguida, enche-se o picnómetro com água, de forma a pré-saturar os agregados, durante um período de tempo nunca inferior a 24 horas;
- Após o período de tempo referido, regista-se o peso do conjunto provete+água+picnómetro, M_2;
- Seguidamente, retira-se o provete do picnómetro e procede-se à secagem manual do mesmo, com o objetivo de retirar a água superficial; regista-se, depois, o peso da amostra saturada com a superfície seca, M1;
- Enche-se o picnómetro com água e regista-se o peso do conjunto água+picnómetro, M_3;
- Por fim, coloca-se o material em estufa ventilada a 105 °C até atingir a massa constante e regista-se o peso do material seco, M_4.

3.3.1.2.4. Resultados dos ensaios

As Massas volúmicas das partículas ($\rho_a \rho_{rd}$, eρ_{ssd}) em quilogramas por decímetro cúbico, são calculadas de acordo com as seguintes expressões:

$$\rho_a = \frac{\mathrm{M}_4}{[\mathrm{M}_4 - (\mathrm{M}_2 - \mathrm{M}_3)]/\rho_W} \tag{3.2}$$

$$\rho_{rd} = \frac{\mathrm{M}_4}{[\mathrm{M}_1 - (\mathrm{M}_2 - \mathrm{M}_3)]/\rho_W} \tag{3.3}$$

$$\rho_{ssd} = \frac{\mathrm{M}_1}{[\mathrm{M}_1 - (\mathrm{M}_2 - \mathrm{M}_3)]/\rho_W} \tag{3.4}$$

A absorção de água (em percentagem da massa seca) após imersão em água durante 24 horas ($W_{abs,24}$) determina-se pela seguinte expressão:

$$W_{abs,24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \tag{3.5}$$

Onde,

ρ_a – Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm^3);

ρ_{rd} – Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm^3);

ρ_{ssd} – Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm^3);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura registada na pesagem de M_2 (kg/dm^3);

$W_{abs,24}$– Absorção de água após imersão em água durante 24 h (%);

M_1 – Massa do provete saturado com superfície seca (g);

M_2 – Massa do conjunto água+provete+balão (g);

M_3 – Massa do picnómetro cheio de água (g);

M_4 – Massa da amostra de ensaio após secagem em estufa (g).

3.3.1.2.5. Teor de Humidade

O teor de humidade dos agregados é calculado pela seguinte expressão:

$$TH(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.6)$$

Onde;

m_1 – Massa do agregado seco (após 24 horas em estufa);

m_2 – Massa do agregado em ambiente natural.

3.3.1.2.6. Apresentação e discussão de resultados

No Quadro 3.3 apresentam-se os resultados refente à baridade, massas volúmicas das partículas ($\rho_a \rho_{rd}$ e ρ_{ssd}), teor de humidade (TH) e absorção de água após 24 h de imersão ($W_{abs,24}$).

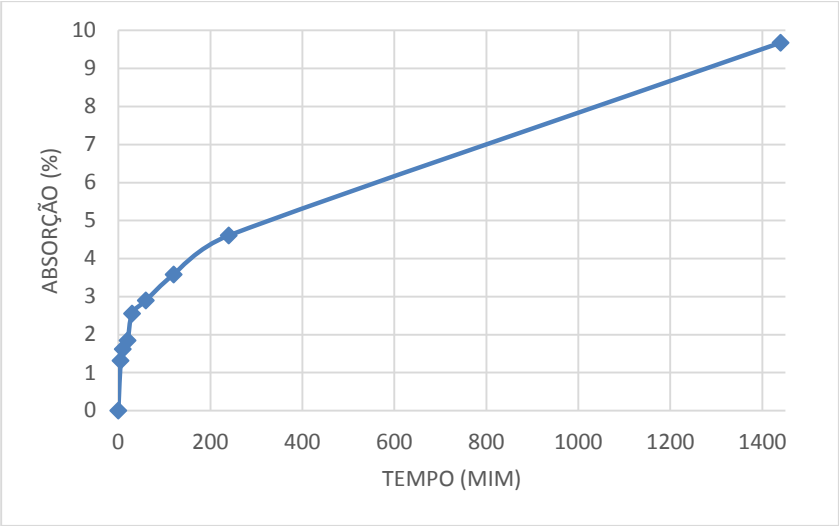
Quadro 3. 3 - Massas volúmicas, absorção e teor de água dos agregados

	Baridade (kg/m³)	ρ_a (kg/m³)	ρ_{rd}(kg/m³)	ρ_{ssd} (kg/m³)	$W_{abs,24}$ (%)	TH (%)
Areia leve	578	944	865	949	9,68	0,16
Leca HD	633	1297	1161	1266	9,07	0,17
Areia fina	1450	2603	2590	2595	0,19	0,08
Areia grossa	1589	2684	2614	2640	1,00	0,11
Bago de arroz	1353	2691	2651	2666	0,55	0,13
Brita 1	1368	2699	2672	2682	0,38	0,04

Como seria de esperar, a Leca HD e a areia leve apresentam baridades e massas volúmicas dentro dos limites estalecidos pelas normas europeias na definição dos agregados leves. Nas normas EN 13055-1 (2002) e NPEN206-1 (2005), os agregados leves são definidos como agregado de origem mineral com massa volúmica, após secagem em estufa, menor ou igual a 2000 kg/m³ ou com baridade inferior a 1200 kg/m³. Estes resultados estão de acordo com os valores de baridade usualmente referidos para este tipo de agregado de argila expandida (Chandra e Berntsson 2003), (Newman 1993)], situados entre cerca de 300 e 800 kg/m³. Os resultados obtidos estão ainda de acordo com o documentado no EuroLightConR4 (2000), onde se verifica que tendo em conta diferentes tipos de agregados, a relação entre a baridade e a massa volúmica da partícula varia entre 0,4 e 0,7.

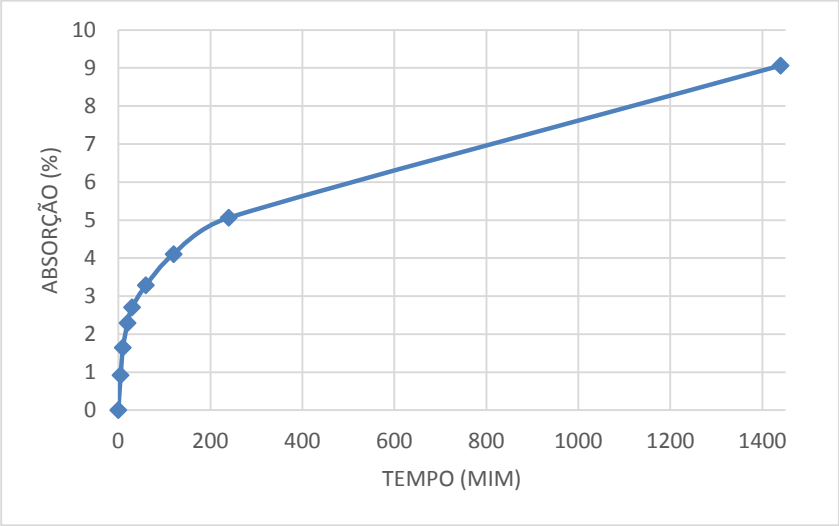
Tal como seria de esperar, os agregados leves apresentam maiores valores de absorção de água devido a sua maior porosidade. De acordo com o referido no EuroLightConR2 1998, Os agregados leves mais correntes apresentam valores de absorção entre 5 e 25%, podendo-se assim que considerar a absorção obtidas nos agregados analisados é baixa a moderada.

Nas Figuras 3.3 e 3.4, apresentam-se os gráficos de evolução de absorção de água dos agregados leves durante as primeiras 24 horas.



Tempo (min)	Absorção,t(%)
0	0,00
5	1,31
10	1,62
20	1,85
30	2,55
60	2,90
120	3,58
240	4,61
1440	9,68

Figura 3.3- Curva de evolução de absorção de água da areia leve



Tempo (min)	Absorção,t(%)
0	0,00
5	0,92
10	1,64
20	2,29
30	2,70
60	3,28
120	4,11
240	5,06
1440	9,07

Figura 3. 4 - Curva de evolução de absorção de água da Leca

Tal como constatado por Smeplass (2000), Virlogeux (1986b), confirma-se que as curvas de absorção são caracterizadas por uma rápida atenuação de taxa de absorção após um curto período inicial em que esta taxa é elevada. Os primeiros períodos de absorção correspondem essencialmente ao preenchimento dos poros superficiais e áreas fissuradas das partículas.

Na areia leve, verifica-se que cerca de 30% da absorção às 24 horas ocorre nos primeiros 60 minutos, ao passo que na Leca, a percentagem de absorção no mesmo período é cerca de 36%. Confirma-se assim que grande parte da absorção ocorre nos primeiros minutos, seguido de uma descida brusca na taxa de absorção.

Apesar das diferenças ao nível da massa volúmica a areia leve apresentou absorção idêntica à Leca. Zhang e Gjorv (1991), ao caracterizarem a absorção de diferentes agregados de argila expandida, verificam também que, em dois tipos de agregados analisados, apesar de a massa volúmica das partículas diferir em cerca de 20%, a absorção aos 30 minutos foi idêntica.

3.4. FORMULAÇÃO DOS BETÕES

3.4.1 Introdução

O betão é uma mistura ponderada de ligante, agregados grossos, agregados finos e água, com ou sema incorporação de adjuvantes e adições, sendo que as suas propriedades se desenvolvem aquando da hidratação do cimento. Dependendo dos materiais e da ponderação utilizada na mistura, é possível obter uma diversidade de betões com diferentes níveis de desempenho.

Os betões foram formulados com base no método de Faury e tendo em consideração betões semelhantes utilizados em estudos anteriores realizados no Instituto Superior Técnico.

3.4.2. Composição dos betões

Tendo por base outros estudos realizados no Instituto Superior Técnico e de modo a obter betões leves correntes de moderada a elevada resistência com abaixamento de 120±20 mm, foram considerados os seguintes dados:

- A dosagem de agregados grossos foi de 350 l/m^3 para todos os betões. Esta dosagem foi definida com base no estudo de composição realizado por Bogas (2011). O valor foi definido tendo em consideração o método de Faury, de modo a se atingirem misturas com compacidade adequad;
- A percentagem de ar arbitrada para todas as composições foi de 3%, ou seja, 30 l/m^3;
- O volume de areia grossa utilizado corresponde a 2/3 do volume da areia total e o volume de areia fina a 1/3 do volume de areia total;
- O betão foi formulado tendo em consideração o método de Faury e ainda tendo em atenção que neste tipo de betões, por razões de estabilidade das misturas, não são aconselháveis volumes de agregados superiores a 400 l/m^3. A dosagem de cimento adoptada foi de 350 kg/m^3 nos betões com a/c=0,60; 400 kg/m^3 nos betões com a/c=0,45 e 450 kg/m^3 nos betões com a/c=0,35;
- Nos betões com relação a/c de 0,45 e 0,35 foi necessário utilizar superplastificante de modo a obter as trabalhabilidades desejadas corresponde a cerca de 120±20 mm de abaixamento.

3.4.2.1. Dosagem de água de amassadura

A dosagem de água efectiva não tem em consideração o volume de água absorvido pelos agregados. Sabendo a relação a/c e a dosagem de cimento, a quantidade de água efectiva é estimada pela seguinte expressão:

$$V_a = {}^{a}/_{c} \times M_c \qquad (3.7)$$

Onde,

V_a – Dosagem de água em l/m³;

M_c – Massa de cimento em kg/m³;

Quadro 3. 4 - Dosagem de água consoante a relação a/c

a/c	M_c	V_a
0.60	350	210
0.45	400	180
0.35	450	157.5

3.4.2.2 Volume total de areia

O volume de areia por metro cúbico de betão, pode ser calculado recorrendo à seguinte expressão:

$$V_{\text{agregado grosso}} + V_{\text{areia total}} + V_{\text{cimento}} + V_{\text{ar}} + V_{\text{água}} = 1$$

$$V_{\text{areia total}} = 1 - V_{\text{agregado grosso}} - V_{\text{cimento}} - V_{\text{ar}} - V_{\text{água}} \quad (^{m^3}/_{m^3}) \qquad (3.8)$$

O volume ocupado pelas partículas de cimento por metro cúbico de betão, pode ser calculado recorrendo à seguinte expressão:

$$V_c = \frac{D_c}{\delta_c} \qquad (3.9)$$

δ_c = 3100 kg/m³ (massa específica do cimento utilizado na campanha experimental)

3.4.2.3 Composições utilizadas

No Quadro 3.5 resumem-se as composições dos diferentes tipos de betões produzidos para cada relação a/c.

Quadro 3.5 - Dosagem dos constituintes dos betões

a/c	V (Agregado grosso)(l/m³)	M (cimento) (kg/m³)	V (água) (l/m³)	V (areia grossa) (l/m³)	V (areia fina) (l/m³)
0,60	350	350	210	198	99
0,45	350	400	180	207	104
0,35	350	450	157,5	212	106

3.4.3. Betão de referência

A composição granulométrica dos agregados grossos utilizados nos betões de referência foi definida de modo a ser idêntica à dos agregados grossos de Leca. Assim, a proporção de bago de arroz e de brita foi definida de modo a que a curva granulométrica da mistura fosse ajustada à curva granulométrica da Leca.

A curva granulométrica da mistura é determinada de acordo com a seguinte expressão:

$$\% \, R_{Bago} x + \% R_{Brita} (1 - x) \quad (3.10)$$

Onde,

R_{Bago} – Percentagem de bago de arroz acumulado no peneiro i;

R_{Brita}– Percentagem de brita acumulada no peneiro i;

x – Proporção de bago de arroz na mistura.

O valor de x foi calculado de forma iterativa, de modo a se atingir o menor desvio quadrático acumulado entre a curva da brita composta (bago de arroz e brita 1) e a curva granulométrica da Leca.

Quadro 3. 6 - Curva granulométrica da brita composta (bago de arroz e brita 1)

	x	0,300	
Peneiros (mm)	**Leca**	**Brita Composta**	Δ^2
16,0	100,0	100,0	0,0
11,2	94,1	91,6	6,2
8,0	66,2	55,7	111,2
5,6	29,8	32,1	5,1
4,0	3,0	14,0	120,7
2,0	0,1	0,9	0,5
1,0	0,1	0,2	0,0
0,5	0,1	0,1	0,0
		$\Sigma\Delta^2$	**243,79**

Na Figura 3.5, apresenta-se a curva granulométrica da Leca e da brita composta por bago de arroz e brita 1, sendo que as abcissas representam a dimensão das partículas em escala logarítmica e as ordenadas a percentagem de material que passa em cada um dos peneiros.

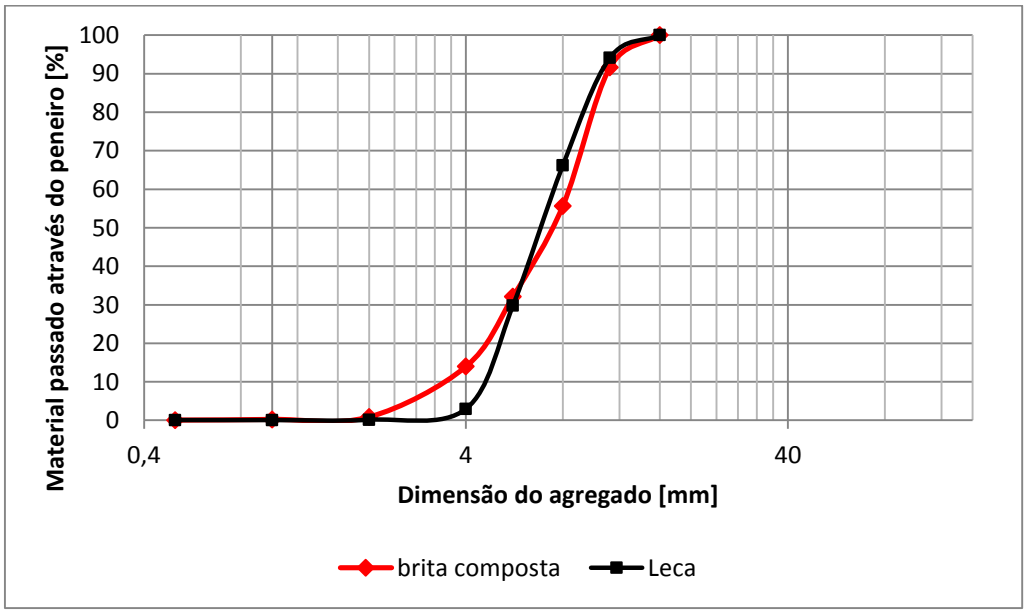


Figura 3. 5 – Curva granulometria da brita composta

Assim, de acordo com a metodologia utilizada, optou-se por definir uma brita composta por 30% de bago de arroz e 70% de brita 1.

3.4.4 Definição das misturas

No Quadro 3.7, apresenta-se a massa dos constituintes do betão, sem ter em consideração a correcção da quantidade de água total, variável em função da absorção e do teor em água dos agregados.

Quadro 3.7 - Composições dos betões

	Tipo de agregado grosso	a/c	M (agragado grosso) (kg/m³)	M (bago) (kg/m³)	M (areia grossa) (kg/m³)	M (areia fina) (kg/m³)	M (cimento) (kg/m³)	M (água) (kg/m³)	SP (%)
BN 1	Brita 1	0,6	660	516	516	258	350	210	-
BN 2	Brita 1	0,45	660	541	541	270	400	180	0,4
BN 3	Brita 1	0,35	659	549	549	275	450	157.5	0,7
BL 1	Leca	0,6	375	-	516	258	350	210	-
BL 2	Leca	0,45	375	-	541	270	400	180	0,2
BL 3	Leca	0,35	374	-	549	275	450	157.5	0,55
BL 4	Leca	0,35	374	-	216[a]	275	450	157.5	0,5

a – Areia grossa substituída por areia Leca (BL 4)

O cálculo do volume de betão produzido para cada composição é apresentado no Anexo B. Para os betões com relação a/c de 0,45 foi necessário produzir 74 litros de betão e nos betões com relação a/c de 0,35 e 0,60 foi necessário produzir 62 litros de betão.

A correcção da quantidade de água de amassadura devido à absorção dos agregados depende do teor em água inicial do agregado na altura em que se procedeu à amassadura. O volume total de água é quantificado pela seguinte expressão:

$$V_{\text{água total}} = V_1 + \sum \text{Abs}_i \times M_i \qquad (3.11)$$

Onde;

V_1 – Volume de água efectiva sem correcção da absorção dos agregados;

Abs_i – Absorção do agregado i;

M_i – Massa do agregado i.

No Quadro 3.8, resumem-se as massas dos constituintes utilizados em cada betonagem, tendo em conta a correcção da quantidade de água devido à absorção dos agregados.

Quadro 3.8 - Massa dos constituintes dos betões por betonagem

	Tipo de agregado grosso	a/c	M(agregado grosso)(kg)	M(bago) (kg)	M (areia grossa) (kg)	M (areia fina) (kg)	M (cimento) (kg)	M (água corrigida) (kg)	SP (g)
BN 1	Brita 1	0,6	41,213	17,297	32,061	16,030	21,747	13,223	-
BN 2	Brita 1	0,45	49,301	20,692	40,211	20,068	29,731	13,588	119,0
BN 3	Brita 1	0,35	41,951	17,297	34,111	17,087	27,960	9,961	199,3
BL 1	Leca	0,6	23,337	-	32,061	16,030	21,747	14,912	-
BL 2	Leca	0,45	27,917	-	40,211	20,068	29,731	15,609	59,5
BL 3	Leca	0,35	23,275	-	34,111	17,087	27,960	11,645	154,7
BL 4	Leca	0,35	23,275	-	13,437	17,087	27,960	12,987	139,8

a – Areia grossa substituída por areia Leca (BL 4)

3.5. PRODUÇÃO DOS BETÕES

Os betões foram produzidos de acordo com o procedimento de amassadura adoptado por Bogas (2011),que visa minimizar o efeito da elevada absorção de água deste tipo de material e garantir condições adequadas de homogeneidade das misturas. A produção dos espécimes foi realizada segundo quatro fases distintas: dosagem, mistura, moldagem, compactação e cura.

3.5.1. Correcção das misturas

Dado que não se procedeu à pré-saturação ou à pré-secagem dos agregados, houve a necessidade de determinar o seu teor em água e posteriormente realizar o devido acerto em relação à quantidade de material necessário.

Foi também necessário corrigir a quantidade de água de amassadura, de modo a ter em conta a absorção dos agregados durante a mistura. De acordo com a EN 206, a absorção de água efectiva na mistura corresponde aproximadamente à absorção dos agregados imersos em água durante 1 h. Bogas (2011) e Chandra (2003) referem períodos equivalentes de 30 minutos. Assim optou-se por estimar a absorção durante a mistura como sendo equivalente a 30 minutos de absorção em água, com os agregados a apresentarem o teor de água inicial com que foram utilizados.

Através do procedimento referido, foi possível garantir o controlo da trabalhabilidade e da relação a/c efectiva da mistura.

3.5.2. Mistura

Os betões foram produzidos numa misturadora de eixo inclinado basculante com uma capacidade de 80 litros. Inicialmente foram misturados todos os agregados com cerca de 50% da água prevista para a mistura. Após cerca de 2 minutos de mistura, manteve-se o equipamento em repouso durante mais 1 minuto de modo a garantir a adequada pré-molhagem dos agregados.

Em seguida foi adicionado o cimento e a restante água de forma gradual e misturou-se durante cerca de 4 minutos. Nas misturas com superplastificante, este foi adicionado 1 minuto após se ter adicionado o cimento e 40% da água. Os betões foram produzidos de modo a apresentar um abaixamento de 120±20 mm.

3.5.3.Moldagem, compactação e cura

Após a mistura, determinou-se a massa volúmica do betão fresco de acordo com a norma NP EN 12350-6 (2002). Após o enchimento dos moldes, o betão foi vibrado de acordo com a norma NP EN 12390-2 (2000), que define que a vibração do betão deve ser feita numa única camada em provetes com altura igual ou inferior a 10 cm e em duas camadas em provetes com altura de 30 cm.

Dado que nos betões leves, existe um risco maior de segregação por subida do agregado, o tempo de vibração foi limitado a cerca de 10 segundos, sem no entanto comprometer a compacidade adequada da mistura. Após a vibração, a superfície dos moldes foi alisada, recorrendo a uma colher de pedreiro.

Os provetes permaneceram no interior dos moldes durante um período de 24± 2 horas, devidamente protegidos por folha plástica antes de se proceder à desmoladagem.

Após a desmoldagem, os provetes foram identificados e curados em ambiente de humidade relativa superior a 95% até à idade de ensaio.

3.6. ENSAIOS DO BETÃO NO ESTADO FRESCO

No presente trabalho foram realizados os ensaios de abaixamento e de massa volúmica do betão no estado fresco, referidos nos pontos em seguida.

3.6.1. Ensaio de abaixamento

3.6.1.1. Objectivo e norma do ensaio

Foi adoptado o procedimento de ensaio especificado na norma NP EN 12350-2 (2002) "Ensaio do betão fresco Parte 2: Ensaio de abaixamento". O objectivo principal deste ensaio é determinar um parâmetro relacionável com a trabalhabilidade do betão em estudo. Os betões foram produzidos de modo a apresentarem um abaixamento de 120±20 mm.

3.6.1.2. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- O ensaio inicia-se com uma molhagem prévia do molde tronco-cónico e a placa metálica, deixando-se, de seguida, escorrer a água;
- Após a pré-molhagem do material, preenche-se o molde com a amostra recolhida; o enchimento deve ser realizado em três camadas iguais a sensivelmente um terço da altura do molde; após o enchimento de cada camada; compacta-se a amostra com 25 pancadas verticais com o auxílio do varão de compactação (Figura 3.6); durante todo o processo, deve manter-se fixo o molde contra a placa com os pés sobre as abas;
- Retira-se o funil e rasa-se a superfície de betão com uma colher de pedreiro; de seguida; elimina-se o excesso de betão da placa;
- Remove-se cuidadosamente o molde; levantando-se na vertical; a operação de desmoldagem deverá ser executada através de um deslocamento único e firme, sem transmissão de qualquer movimento lateral ou torsional;
- Por fim, regista-se o abaixamento, com auxílio de uma régua.

Figura 3.6 - Equipamento para o ensaio de abaixamento

3.6.1.3. Resultados do ensaio

O abaixamento do cone de Abrams é dado pela diferença entre a altura do cone e o ponto mais alto do provete que sofreu a deformação, medido em duas direcções. O ensaio é considerado válido quando se obtém um abaixamento verdadeiro, ou seja, o betão coeso e simétrico (Figura 3.7).

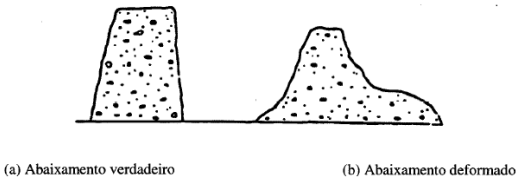


Figura 3.7 - Tipos de abaixamento

3.6.2. Massa volúmica

3.6.2.1. Objectivo e norma do ensaio

Foi adoptado o procedimento de ensaio especificado na norma NP EN 12350-6 (2002) “Ensaio do betão fresco Parte 6: Massa volúmica”. O objectivo principal deste ensaio é determinar a massa volúmica do betão no estado fresco e ainda permitir aferir eventuais desvios face à composição teórica prevista para o betão.

3.6.2.2. Procedimento de ensaio

Foi adoptado o seguinte procedimento:

- Começa por pesar-se o recipiente vazio e registar a sua massa;
- De seguida, enche-se o recipiente com a amostra recolhida em duas camadas; após preencher cada camada, compacta-se o betão com a agulha vibratória, mantendo-a numa posição vertical e sem tocar nas extremidades do recipiente; o período de compactação deve ser adequado de modo a prevenir quaisquer indícios de segregação ou exsudação;
- Após o enchimento total do recipiente, alisa-se a superfície com recurso à colher de pedreiro;

- Elimina-se o excesso de betão no exterior do recipiente;
- Pesa-se o recipiente com o betão fresco e regista-se a sua massa.

3.6.2.3. Resultados do ensaio

A massa volúmica do betão no estado fresco é dada pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V} \ [kg/m^3] \qquad (3.12)$$

Em que,

ρ – Massa volúmica do betão fresco;

M_1 – Massa do recipiente vazio;

M_2- Massa do conjunto recipiente e betão;

V – Volume do recipiente.

3.7. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.7.1. Resistência à compressão

3.7.1.1. Objectivo

O objectivo principal é determinar a resistência à compressão dos diferentes betões sob uma tensão de compressão uniforme.

3.7.1.2. Normas de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2003) "*Ensaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*". Os aspetos relativos à geometria, dimensão, execução e cura dos provetes de ensaio encontram-se descritos respetivamente na norma NP EN 12390-1 (2003) "*Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes"* e na norma NP EN 12390-2 (2003) *"Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica".*

3.7.1.3. Aparelhos e utensílios

Para a realização dos ensaios de compressão foi utilizada uma prensa hidráulica de 4 colunas com capacidade de 3000 KN e conforme com a norma NP EN 12390-4 (Figura 3.8 e Figura 3.9).

Figura 3.8 - Prensa hidráulica de 4 colunas

Figura 3.9 - Controlo da prensa hidráulica de 4 colunas

3.7.1.4. Procedimentos do ensaio

O ensaio foi realizado em provetes cúbicos de 150 mm de aresta, após serem sujeitos a cura húmida até à idade de ensaio. No presente trabalho foram ensaiados 3 provetes aos 7 dias de idade e 8 provetes aos 28 dias de idade por cada tipo de betão.

O ensaio foi realizado de acordo com o seguinte procedimento:

- Após o período de cura, retira-se o provete do ambiente de cura;
- Remove-se o excesso de humidade e/ou sujidade do provete;
- Pesa-se e regista-se a massa do provete,
- Limpam-se cuidadosamente todas as superfícies da máquina de ensaio;
- Posiciona-se o provete centrado relativamente ao prato inferior e de forma à carga ser aplicada perpendicularmente à direcção de moldagem, sem uso de calço entre o provete e os pratos da máquina de ensaio;
- Aplica-se a carga a uma velocidade constante de 0.2 a 1 MPa/s de forma contínua e sem choques, até se atingir a rotura do provete. No presente trabalho, os ensaios foram realizados para uma velocidade de carga de 0,6 MPa/s;
- Regista-se a carga máxima atingida F;
- Repetem-se todos procedimentos descritos para todos os provetes a ensaiar.

3.7.1.5. Resultados do ensaio

A resistência à compressão de cada provete é dada pela seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \tag{3.13}$$

f_c – resistência à compressão do provete (MPa ou N/mm^2);

F – carga máxima (N);

A_c – área da secção transversal do provete na qual a força é aplicada (mm^2).

3.7.2. Resistência à tracção por compressão diametral

3.7.2.1. Objectivo

Um provete cilíndrico é submetido a uma força de compressão aplicada numa estreita zona ao longo do seu comprimento, gerando-se tensões ortogonais que provocam a rotura do provete por tracção.

3.7.2.2. Norma de ensaio

O ensaio de compressão diametral é realizado de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2003) *"Ensaios ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes"*. Os aspetos relativos à geometria e dimensões dos provetes de ensaio encontram-se descritos na norma NP EN 12390-1 (2003) *"Ensaios ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes".* A execução e cura dos provetes de ensaio, foi efectuada de acordo com a norma NP EN 12390-2 (2003) *Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica".*

3.7.2.3. Aparelhos e utensílios

Para a realização do ensaio de compressão diametral foram utilizados os seguintes procedimentos:

- Prensa hidráulica de 4 colunas, com capacidade de 3000 KN, conforme com a norma NP EN 12390-4 (Figura 3.10);
- Posicionador composto por estrutura de suporte dos provetes em aço (Figura 3.11 e Figura 3.12);
- Peça em aço para transmissão de carga;
- Faixas de cartão prensado,
- Pano para limpeza dos provetes.

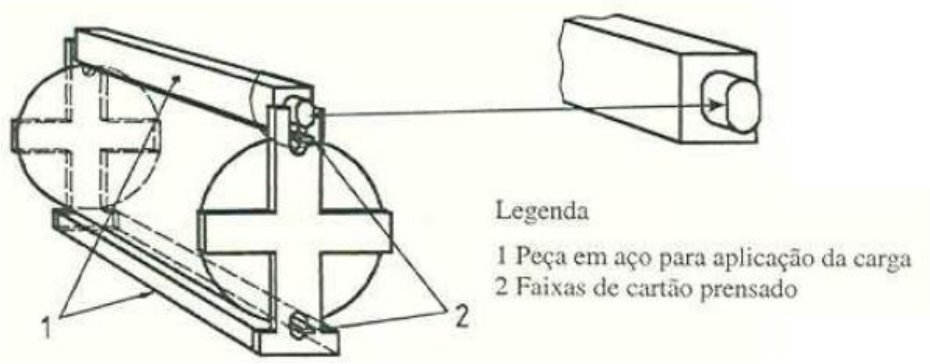


Figura 3.10 - Esquema ilustrativo de um posicionador (NP EN 12390-6)

Figura 3.11- Posicionador

Figura 3.12 - Posicionador na prensa hidráulica de 4 colunas

3.7.2.4. Procedimento de ensaio

O ensaio de compressão diametral foi realizado em 3 provetes cilíndricos, com um diâmetro de 150 mm e 300 mm de altura. Os betões foram curados até a idade de ensaio que ocorreu aos 28 dias. Os ensaios foram realizados de acordo com o seguinte procedimento:

- Após o período de cura, retira-se o provete do ambiente de cura;
- Remove-se o excesso de humidade e/ou sujidade do provete;
- Limpam-se cuidadosamente todas as superfícies da máquina de ensaio;
- Posiciona-se as faixas de cartão prensado e a peça de carga ao longo do topo e da base do plano de carregamento do provete;
- Coloca-se o provete em posição central na máquina de ensaio, usando o posicionador (Figura 3.12);
- Aplica-se a carga a uma velocidade constante de 0.04 a 0.06 MPa/s, de forma contínua e sem choques. No presente trabalho foi considerado uma velocidade de carga de 0,05 MPa/s;
- Regista-se a carga máxima atingida F;
- Repetem-se os procedimentos descritos para todos os provetes a ensaiar.

3.7.2.5. Resultados

A resistência à tracção por compressão diametral é determinada pela seguinte expressão:

$$f_{ct} = \frac{2.F}{\pi.L.d} \tag{3.14}$$

Onde,

f_{ct} – resistência à tracção por compressão diametral (MPa ou N/mm^2);

F – carga máxima (N);

L – comprimento da linha de contacto do provete (mm);

d – dimensão da secção transversal (mm).

3.7.3. Módulo de Elasticidade

3.7.3.1. Objectivo

O presente ensaio permite determinar o módulo de elasticidade secante do betão em compressão, após um número especificado de ciclos de carga, para um nível de tensão na ordem de 1/3 da resistência média à compressão (f_{cm}).

3.7.3.2. Norma de ensaio

A metodologia de ensaio é fixada pela norma LNEC E-397 *"Betões: Determinação do módulo de elasticidade em compressão"*

3.7.3.3. Aparelhos e utensílios

Na realização do ensaio do módulo de elasticidade foram considerados os seguintes equipamentos:

- Prensa hidráulica (Figura 3.14) com capacidade de 250 KN;
- *Data logger*, acoplado à prensa hidráulica, que irá transmitir para um PC os sinais elétricos emitidos pelos sensores de leitura (Figura 3.13);
- Extensómetros elétricos;
- Pano para limpeza dos provetes.

3.7.3.4. Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado em 2 provetes cilíndricos por composição, com um diâmetro de 150 mm e 300 mm de altura. Os provetes foram ensaiados após 28 dias de cura húmida. Apenas os betões com relação a/c=0,45 foram ensaiados.

Na determinação do módulo de elasticidade foi adoptado o seguinte procedimento de acordo com a norma LNEC E397:

- Remove-se o excesso de humidade e/ou sujidade do provete;
- Aplicam-se 2 extensómetros, diametralmente opostos, no provete;
- Limpa-se cuidadosamente todas as superfícies da máquina de ensaio;
- Posiciona-se o provete, de modo a que a aplicação da carga seja a mais centrada possível, com auxílio de uma rótula metálica que apenas permite a passagem de esforço axial;
- De modo a verificar o correto posicionamento do provete, a variação de extensão nos dois extensómetros ($|\varepsilon_{ext1} - \varepsilon_{ext2}|$), após um ciclo de carga, não deve diferir mais do que 10%;
- Aplica-se um ciclo de carga no provete, fazendo variar a tensão entre 0.5 a 1.0 MPa (σ_i = 0.5 a 1.0 MPa) e 1/3 da tensão média de resistência à compressão (σ_f = fc / 3);
- Registam-se as extensões iniciais e finais obtidas, assim como as tensões aplicadas;

- Após cada ciclo, verifica-se a diferença entre a média das variações de extensão do presente ciclo e do ciclo anterior ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}|$), sendo que esta deve ser inferior a 10^{-5}; caso o valor seja superior, o ciclo de carga deve ser repetido;
- Efetuam-se os ciclos necessário, até que ponto anterior ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| < 10^{-5}$) seja verificado entre dois ciclos sucessivos.

Figura 3. 13 - PC e data logger (à esquerda) e controlo da prensa hidráulica (à direita)

Figura 3. 14 - Prensa hidráulica com provete

3.7.3.5. Resultados

O módulo de elasticidade em compressão, E_c, pode ser obtido de acordo com a seguinte expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad (3.15)$$

Onde,

E_C – módulo de elasticidade em compressão (GPa);

$\sigma_{i,n}$ – tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa);

$\sigma_{f,n}$ – tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa);

$\varepsilon_{i,n}$ – extensão para a tensão $\sigma_{i,n}$ registado no ciclo n;

$\varepsilon_{f,n}$ – extensão para a tensão $\sigma_{f,n}$ registada no ciclo n.

Foram realizados os ensaios do módulo de elasticidade para os provetes BN2 e BL2 aos 28 dias, ambos com relação a/c de 0,45.

3.8. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

3.8.1. Ensaio de avaliação da condutibilidade térmica

Para a caracterização da condutibilidade térmica dos betões foi utilizado o equipamento ISOMET 2114, que permite determinar as principais características térmicas dos provetes por meio de uma sonda de superfície (Figura 3.15)

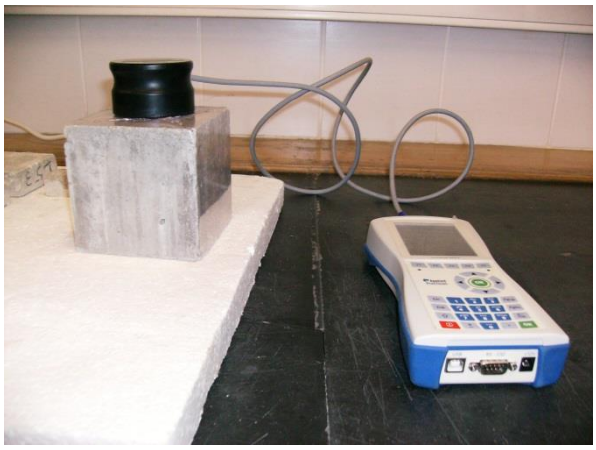


Figura 3.15 – Exemplo de realização de um ensaio com o equipamento ISOMET 2114

3.8.2. Procedimento de ensaio

O ensaio baseia-se na análise da resposta térmica do material analisado aos impulsos de calor emitidos pela sonda da máquina. O fluxo de calor é criado através de uma resistência elétrica induzida à sonda, a qual está em contacto directo com o provete ensaiado. O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade, tendo para tal sido efectuadas três medições para cada provete. A amostra deve possuir uma direcção mínima transversal de 10 cm.

Os provetes encontravam-se inicialmente saturados. Por este motivo, os provetes foram envolvidos por uma película plástica, evitando o contacto directo com a sonda de superfície. Os provetes foram assentes sobre uma placa de XPS (poliestireno extrudido) para isolar o sistema (sonda + provete) do material adjacente sobre o qual todo o conjunto é aplicado.

Em seguida, a sonda de superfície foi posicionada sobre o provete e iniciado o ensaio. No equipamento é necessário inserir os dados relativos ao intervalo expectável do coeficiente de condutibilidade do material (0 – 0,3; 0,3 – 2; 2 – 6 W/m°C) e o número de ensaios a realizar.

Cada ensaio tem a duração de aproximadamente 15 minutos, obtendo-se os resultados referentes às principais propriedades térmicas do provete, nomeadamente o coeficiente de condutibilidade (λ), a velocidade da dissipação do calor, α [m^2/s], e a capacidade térmica volumétrica C_p – [$J/m^{3}°C^{-1}$].

3.8.3. Resultados do ensaio.

Os ensaios foram realizados para três condições de humidade: equilíbrio com a humidade relativa ambiente, na ordem dos 65-75%, betões saturados, betões secos em estufa durante 15 dias. Os resultados dos ensaios são armazenados na máquina: nomeadamente o coeficiente de condutibilidade térmica λ [W/m.K], a velocidade da dissipação do calor α [m^2/s] e a capacidade térmica volumétrica C_p – [$J/m^3°C^{-1}$].

3.9. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.9.1. Propriedades dos betões no estado fresco

Para todas as amassaduras foram realizados os ensaios de determinação da massa volúmica fresca e abaixamento, de modo a controlar a qualidade dos betões produzidos. No Quadro 3.9 indicam-se os valores obtidos para o abaixamento no cone de Abrams e massa volúmica no estado fresco.

Quadro 3.9 - Abaixamento e massa volúmica em estado fresco

Tipo de betão	Abaixamento (mm)	Massa volúmica fresca (kg/m^3)
BN 1	120	2298
BN 2	115	2317
BN 3	120	2331
BL 1	120	1789
BL 2	140	1796
BL 3	120	1821
BL 4	130	1487

Conforme estabelecido, as misturas apresentam valores de abaixamentos na gama de valores entre 120±20 mm, independentemente do tipo de agregado e relação a/c. Verificou-se uma ligeira redução da trabalhabilidade nos betões com agregados de massa volúmica normal, dado estes apresentarem forma menos esférica e, como tal, maior atrito interno. A introdução adicional de areia leve, dendo à sua forma relativamente arredondada, apesar da presença de maior quantidade de partículas partidas não teve grande repercussão na trabalhabilidade.

Conforme esperado, ocorreu uma redução na massa volúmica fresca dos betões quando se procedeu a substituição de agregados de massa volúmica normal por agregados leves de elevada porosidade. A substituição de agregado grosso normal por agregado leve conduziu a redução de 22% na massa volúmica.

Por sua vez, a substituição parcial de 67% dos agregados finos de massa volúmica normal por areia leve (BL 4), conduziu a uma redução de 19,4% na massa volúmica fresca.

3.9.2. Propriedades mecânicas dos betões no estado endurecido

Neste sub-capítulo, será realizado uma análise dos resultados relativos as propriedades mecânicas dos betões. Será possível avaliar o comportamento relativo dos betões leves face aos betões convencionais de composição semelhante.

No Quadro 3.10, indicam-se os valores obtidos da resistência à compressão, resistência à tracção, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e a massa volúmica seca para cada composição.

Quadro 3. 10 - Resultados da massa volúmica seca e das propriedades mecânicas dos betões

Tipo de betão	MV seca (Kg/m^3)	$f_{cm,\ 7d}$ (MPa)	$f_{cm,\ 28d}$ (MPa)	$f_{ctm,\ 28d}$ (MPa)	$E_{c\ 28d}$ (GPa)	v	$f_c/\rho_{s,\ 28d}$ (x 10^3 m)
BN 1	2260	35,4	45,7	3,43			2,02
BN 2	2285	54,3	62,6	4,8	42,6	0,22	2,74
BN 3	2343	66,7	75,6	5,87			3,23
BL 1	1629	27,3	34,1	2,22			2,09
BL 2	1706	-	39,8	3,01	20,5	0,4	2,33
BL 3	1801	-	49,9	3,94			2,77
BL 4	1406	30,7	34,8	2,55			2,48

No Quadro 3.11, indicam-se as reduções médias das propriedades mecânicas dos betões leves face aos betões normais.

Quadro 3. 11 – Redução percentual das propriedades mecânicas entre betões

	$f_{cm,\ 28d}$ (%)	$f_{ctm,\ 28d}$ (%)	$E_{c,\ 28d}$ (%)
BL 1 face BN 1	25,4	35,3	
BL 2 face BN 2	36,4	37,3	51,9
BL 3 face BN 3	34,0	32,9	
BL 4 face BL 3	30,3	35,3	

3.9.2.1. Resistência à compressão

Tendo em consideração os valores apresentados nos Quadros 3.10 e 3.11, verifica-se que a substituição de agregados grossos de massa volúmica normal por agregados leves conduz a reduções médias na resistência à compressão de 25, 36 e 34%, respectivamente para os betões com relação a/c de 0,60; 0,45 e 0,35.

Tal como esperado, constata-se assim que a percentagem da redução de resistência dos BEAL face aos BAN, tende a aumentar com a redução da relação a/c, dado que o agregado assume maior influência para níveis de resistência superior.

A substituição adicional de parte da areia natural por areia leve conduziu a uma redução acrescida de 30% na resistência à compressão, visto que se aumentou o nível de porosidade na matriz circundante que envolve os agregados grossos. Esta redução na resistência enquadra-se no intervalo observado

por Faust (2000), que reporta 20 a 30% de diminuição em betões com areias leves de composição semelhante à adoptada no presente estudo.

Confirma-se que a utilização de agregados leves implica uma redução da resistência, sendo mais importante nos agregados de menor massa volúmica.

Observa-se ainda que os betões com agregados leves tendem a evoluírem menos na resistência dos 7 para os 28 dias de idade. Tal seria esperado, dado que em idades superiores, a resistência nos BEAL tende a ser limitada pela capacidade do agregado. O mesmo é observado por outros autores (FIP 1983, Faust 2000; Bogas 2013).

Nos vários betões analisados, verificou-se existir uma boa relação entre a resistência e a relação a/c, pelo menos na gama de valores considerados. Como seria de esperar, tanto nos betões normais como nos betões leves, constata-se que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação a/c.

3.9.2.2. Eficiência estrutural

A eficiência estrutural de um betão é dado pela relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica, traduzindo a potencialidade do betão em soluções onde a carga permanente é relevante. Os valores relativos à eficiência estrutural de cada um dos betões produzidos apresenta-se nos Quadro 3.10.

Apenas nos betões com relação a/c elevada (a/c=0,6) atingiram-se soluções mais eficientes nas misturas com agregados leves, o que significa a maior apetência destes betões para a produção de betões de baixa e moderada resistência. Nos betões de elevado a/c, onde a compacidade da pasta assume um papel mais relevante na resistência do que o agregado leve, a eficiência estrutural foi superior nos BEAL. De facto, nesta situação a resistência é condicionado pela pasta e o agregado tem uma maior participação na redução da massa volúmica.

Finalmente, a inclusão de areia leve conduz à diminuição da eficiência estrutural resultante da elevada redução que implicou na resistência à compressão. A utilização deste betão justifica-se apenas em soluções onde a exigência de massa volúmica é determinante.

Para os restantes betões verifica-se que à medida que a qualidade da pasta vai aumentando, o agregado vai limitando mais a resistência e a eficiência estrutural sofre um aumento progressivamente menos relevante.

Assim, conclui-se que o tipo de agregado leve utilizado no presente trabalho é vocacionado para a produção de betões de baixa a moderada resistência. Nestes casos, que coincide com a produção de betões estruturais frequentemente utilizados em edifícios, são atingidos soluções alternativas aos betões convencionais, que dependendo do tipo de utilização, podem ser mais vantajosas.

Em todos os betões verifica-se que a eficiência estrutural diminui com a relação a/c, dado que a capacidade resistente da pasta aumenta de forma importante sem grande repercussão na massa volúmica (Figura 3.16).

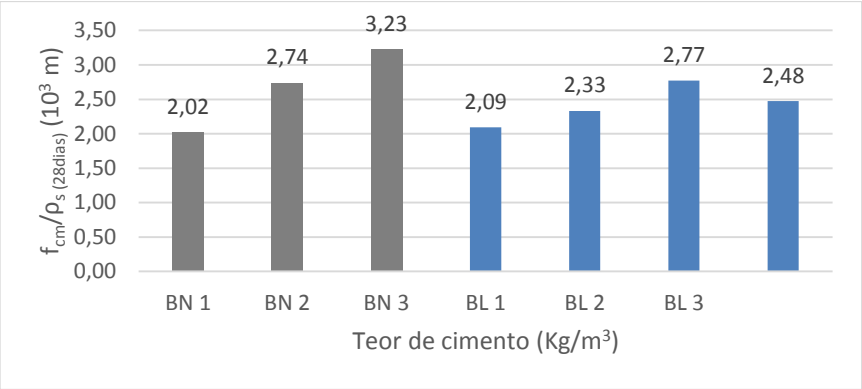


Figura 3.16 - Factores de eficiência estrutural para diferentes tipos de agregados e dosagem de cimento

No Quadro 3.12, resumem-se as possíveis classes de resistência e massa volúmica dos betões de agregados leves produzidos.

Quadro 3. 12 - Classe de resistência dos betões leves

Tipo de betão	$f_{cm,\,28}$ (MPa)	Classe de resistência	Classe de massa volúmica	Massa volúmica seca (kg/m^3)
BL 1	34,1	LC 25/28	D 1,8	1629
BL 2	39,8	LC 30/33	D 1,8	1706
BL 3	49,9	LC 40/44	D 2,0	1801
BL 4	34,8	LC 25/28	D 1,6	1406

3.9.2.3. Resistência à tracção

Nos betões leves analisados neste estudo, obtiveram-se resistência à tracção por compressão diametral entre 2,22 e 3,94 Mpa, aos 28 dias de idade. À semelhança do que sucede na resistência à compressão, os betões normais conduzem a maiores valores de resistência comparativamente aos betões leves de composição semelhante. Como seria de esperar, os betões com agregados mais fracos, são os que apresentam menor capacidade resistente á tracção. De acordo com a ASTMC330 (2004), qualquer dos betões cumpre o valor de resistência à tracção de 2 MPa, requerido para a produção de betões leves estruturais.

Conforme se pode observar nos Quadros 3.10 e 3.11, para os betões de composições semelhantes, verifica-se que a resistência à tracção por compressão diametral nos betões normais é reduzida em cerca de 35,3, 37,3 e 32,9%, quando se substituem os agregados grossos por Leca, para relações a/c de 0,60, 0,45 e 0,35, respectivamente.

Os resultados obtidos indicam que a redução na resistência à tracção dos BEAL foi mais independente da relação a/c do que o sucedido na resistência à compressão. Tal se deve à maior dependência desta propriedade das características do agregado, mesmo tendo em conta betão com pasta de qualidade mais fraca.

Por sua vez, o betão leve com areia leve (BL4) em substituição da areia grossa, alcançou uma redução de 35,3% na resistência à tracção por compressão diametral relativamente ao betão leve de igual

composição (BL 3). Tal como observado na resistência à compressão, a introdução de areia leve tende a prejudicar de forma importante as características mecânicas dos betões.

3.9.2.3. Módulo de elasticidade

De acordo com os resultados apresentados nos Quadros 3.10 e 3.11, verifica-se que o módulo de elasticidade do betão leve (BL 2) é apenas cerca de 52% do obtido no betão convencional de igual composição. Visto que os agregados ocupam uma fracção importante do volume do betão, a substituição de agregados de massa volúmica normal por agregados leves de elevada porosidade e reduzida rigidez conduz a um decréscimo significativo no módulo de elasticidade do betão. Os resultados obtidos corroboram o referido no documento FIB (1983), que para massas volúmicas na ordem dos 1700 kg/m^3, semelhantes às do betão analisado, são referidos reduções médias de 50% face aos BAN de igual composição.

3.9.3. Propriedades térmicas dos betões no estado endurecido

No Quadro 3.13, são indicadas as propriedades térmicas dos provetes para três condições de humidade: betões em equilíbrio com a humidade relativa ambiente (65-75% HR); betões saturados; betões secos em estufa durante 15 dias.

Quadro 3. 13 - Coeficientes de condutibilidade térmica

	Massa (g)	λ (W/mK)	Cp x 10^6 (J/m^{3}k)	a x 10^{-6} (m^2/s)	CV (%)
BN 1	2352,9	λ_{HA} = 2,41	1,60	1,54	0,72
	2384,6	λ_{sat} = 2,46	1,86	1,42	0,32
	2237,2	λ_{sec} = 1,97	1,78	1,24	0,33
BN 2	2396,2	λ_{HA} = 2,58	1,66	1,55	0,20
	2407,7	λ_{sat} = 2,65	1,97	1,33	0,72
	2284,9	λ_{sec} = 2,16	1,13	1,13	0,26
BN 3	2435,6	λ_{HA} = 2,60	1,72	1,40	0,34
	2443,5	λ_{sat} = 2,67	1,81	1,45	1,26
	2338,9	λ_{sec} = 2,20	1,75	1,10	0,18
BL 1	1748,9	λ_{HA} = 1,42	1,80	0,80	0,66
	1768,4	λ_{sat} = 1,49	1,80	0,80	0,22
	1606,5	λ_{sec} = 0,99	1,64	0,60	2,31
BL 2	1815,9	λ_{HA} = 1,55	1,83	0,85	0,96
	1829,4	λ_{sat} = 1,62	1,86	0,87	2,41
	1704,4	λ_{sec} = 1,19	1,72	0,69	0,76
BL3	1900,0	λ_{HA} = 1,63	1,91	0,59	0,72
	1905,1	λ_{sat} = 1,66	1,86	0,90	1,16
	1796,8	λ_{sec} = 1,34	1,67	0,80	0,49
BL 4	1510,8	λ_{HA} = 0,76	1,65	0,46	0,26
	1521,5	λ_{sat} = 0,77	1,76	0,43	0,85
	1402,5	λ_{sec} = 0,54	1,57	0,35	3,05

Onde;

λ_{HA} - Coeficiente de condutibilidade de provetes em equilíbrio com a humidade relativa ambiente (65-75%);

λ_{sat} - Coeficiente de condutibilidade de provetes saturados;

λ_{sec} - Coeficiente de condutibilidade de provetes secos (Após 15 dias em estufa).

Tendo em consideração os resultados indicados no Quadro 3.13, tal como seria de esperar, verifica-se que o coeficiente de condutibilidade térmica varia proporcionalmente com o teor de humidade, sendo naturalmente superior nos betões mais húmidos.

Comparando o coeficiente de condutibilidade térmica nos provetes secos face aos provetes saturados, verifica-se que os betões leves podem apresentar um decréscimo superior no coeficiente de condutibilidade, dado a maior porosidade e absorção de água dos agregados leves que conduzem a maiores variações do teor de humidade no betão. Segundo o documento FIB (1983), são usualmente referidas variações de 2 a 6% na condutibilidade térmica por cada variação de 1% no teor em água do betão.

No presente estudo, tendo em conta os resultados indicados no Quadro 3.13, verifica-se que em termos médios são observados variações de 4,3, 4,6 e 5,1% no coeficiente de condutibilidade por cada grau de humidade, respectivamente para os betões com agregados normais, betões com agregados grossos leves e betão com agregados grossos e finos leves. O incremento observado tende a ser menos nos betões de menor a/c, conforme se pode observar no Anexo H. Constata-se ainda que essas redução tende a ser relativamente independente da relação a/c da misturas.

Confirma-se que os betões leves apresentam menores coeficientes de condutibilidade térmica relativamente aos betões normais de composição semelhante, dado se terem incorporado agregados de menor massa volúmica. Tendo em consideração apenas betões secos, os betões leves demonstram reduções de 50%, 45% e 39% em relação aos betões convencionais de igual composição, respectivamente tendo em consideração misturas com relação a/c de 0,60; 0,45 e 0,35.

Para soluções estruturalmente mais eficientes, que implicam pastas de relação a/c superior a 0,45, o coeficiente de condutibilidade térmica pode ser duas vezes inferior ao observado nos betões convencionais de igual composição.

Por sua vez, o betão leve BL 4 apresenta uma redução de aproximadamente 60% do coeficiente de condutibilidade térmica em comparação ao betão leve BL3, devido à substituição da areia grossa por areia leve. Apesar de estes betões apresentarem eficiências estruturais poucas relevantes evidenciam aumentos muito importantes na capacidade de isolamento térmica, podendo significar resistência térmica quatro vezes superiores à dos betões convencionais.

Na figura 3.17, comparam-se os resultados obtidos no presente estado com os resultados indicados por outros autores, tendo em conta a relação usualmente estabelecida entre o coeficiente de difusão e a massa volúmica dos betões.

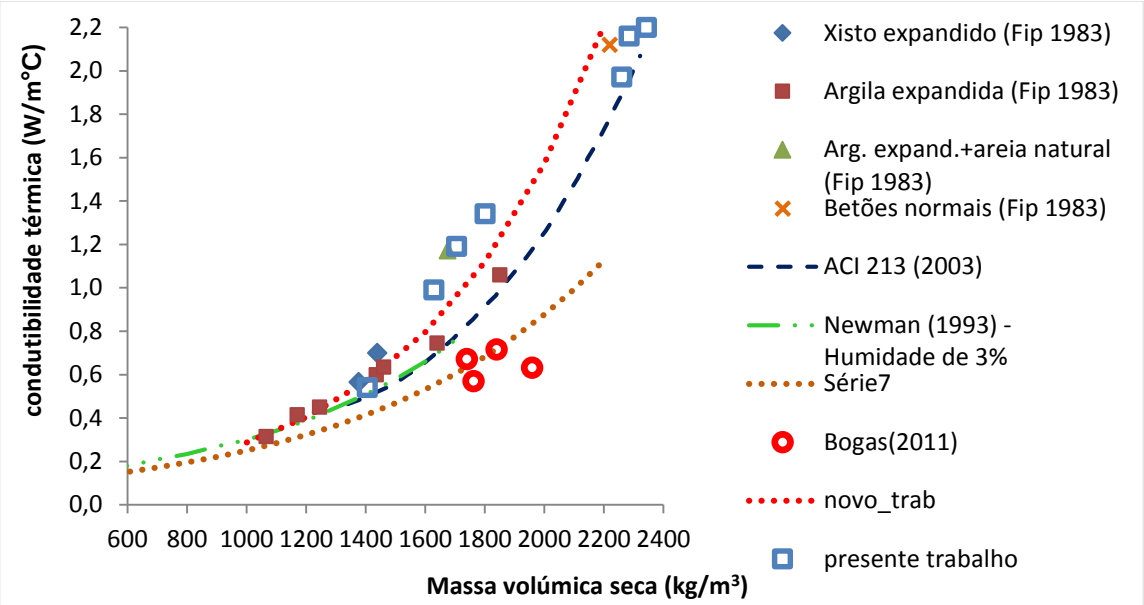


Figura 3. 17- Comparação dos resultados obtidos com outros estudos

De acordo com a Figura 3.17, constata-se que os resultados obtidos seguem a tendência evidenciada por outros autores. No entanto, são geralmente verificadas valores superiores no coeficiente de condutibilidade térmica para uma dada massa volúmica. Tal se deve ao método de ensaio realizado, cuja exactidão ainda não é bem conhecida.

Desde modo, acredita-se que os valores obtidos caracterizam os materiais de forma conservativa. Em relação aos resultados obtidos destaca-se a variabilidade associada ao ensaio realizado (Quadro 3.13), em especial nos betões normais, cuja contabilidade térmica se encontra perto da transição entre gamas de validade do equipamento (Ver 3.8.2.). Tal como referido, para qualquer um dos betões estudados, seria de esperar menores valores do coeficiente de condutibilidade térmica.

4. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS EM BETÃO LEVE

No presente capítulo é, numa primeira fase, descrito o caso de estudo e realizada uma introdução ao programa *EnergyPlus* utilizado nesta dissertação, descrevendo a sua estrutura de funcionamento e os princípios de cálculo subjacentes. Numa segunda fase, serão explicados os principais *inputs* e *outputs* do programa na ótica do utilizador, isto é, pretende-se dar a conhecer de uma forma clara e resumida o modo de funcionamento do programa. Contudo, é aconselhável a consulta do manual do *EnergyPlus* (Ernest, 2013) com vista a encontrar explicações mais detalhadas. Finalmente, apresentar-se-ão ainda os resultados obtidos nas várias simulações energéticas, permitindo avaliar o desempenho térmico de betões estruturais de agregados leves com diferentes composições e condições climáticas.

4.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O objeto de estudo é uma fracção autónoma de tipologia T3 (apartamento) localizada num piso intermédio de um edifício de habitação cuja planta se representa na Figura 4.1.

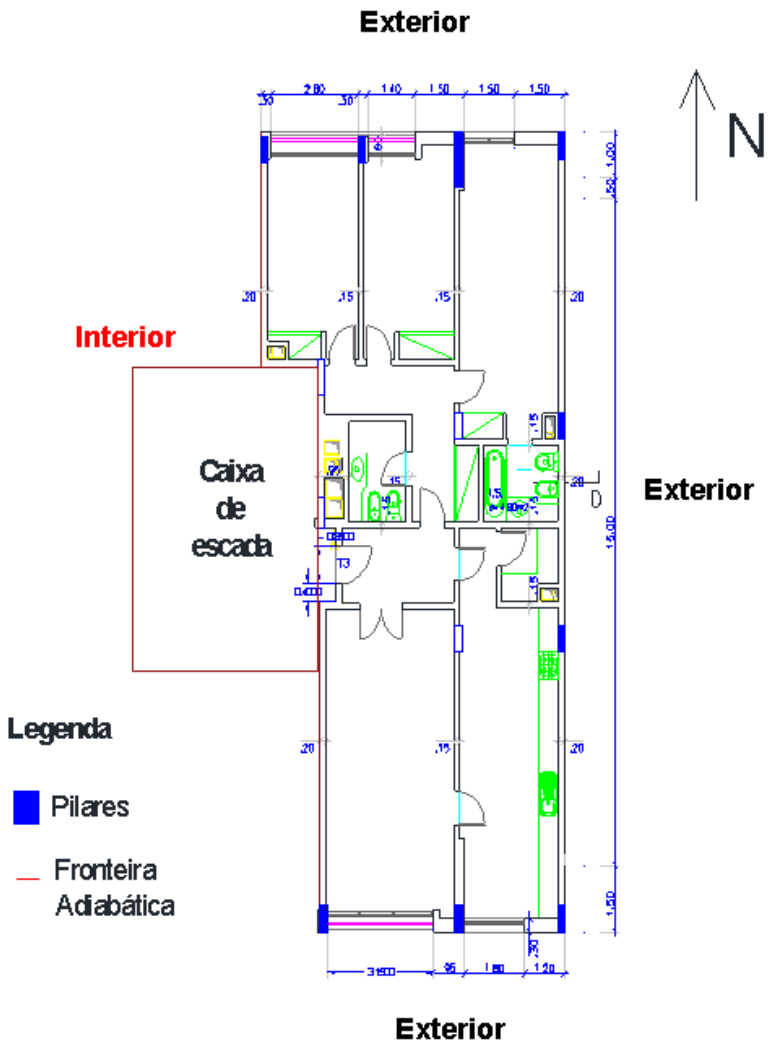


Figura 4.1 - Geometria da fracção autónoma utilizada como caso de estudo

O comportamento térmico da fracção será analisado para diferentes localidades, climas e para os diferentes tipos de betão descritos no Capítulo 3. As principais características da fracção autónoma necessárias introduzir nas simulações energéticas *EnergyPlus* (descritos em 4.3.) são as seguintes:

- a geometria do apartamento, representada na Figura 4.1, tem 118 m^2 de área útil de pavimento e um pé direito de 2,7 metros;
- o talão da viga tem 0,3 m de altura e 0,2 m de espessura e os pilares têm todos 0.2 m de espessura. Todos estes elementos são em betão com uma espessura total de reboco de 3 cm sem qualquer correcção térmica;
- a fracção localiza-se num piso intermédio, logo a laje superior e inferior correspondem fronteiras adiabáticas, o que implica que não há transferência de calor nestas superfícies;
- as paredes que fazem fronteira com a caixa de escadas foram também consideradas por simplificação, como fronteiras adiabáticas;
- as janelas são constituídas por vidro duplo incolor separado por uma caixa de ar (4+ 12+ 4 mm);
- a protecção solar dos vãos envidraçados é constituída por estores venezianos metálicos de cor branca. A protecção solar é activada sempre que a temperatura exterior ultrapassar os 25ºC;
- as paredes exteriores são constituídas por dois panos de tijolo de 11 mm com reboco exterior de 3 cm e interior de 2 cm, separados por uma caixa de ar com 3 cm totalmente preenchido com uma camada de poliestireno extrudido,
- o valor dos ganhos internos adoptado foi de 4 W/m^2; como indicado no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH, 2013);
- o valor da taxa de renovação horária do ar interior por ventilação natural adoptada foi de 1 Rph, cumprindo o requisito mínimo de 0,4 Rph segundo o REH (2003);

Para analisar o comportamento térmico em diferentes condições climáticas foram selecionadas 12 localidades. As localidades nacionais analisadas são: Bragança, Porto, Lisboa e Faro. As localidades internacionais analisadas são: São Paulo (Brasil), Camberra (Austrália), Sófia (Bulgária), Berlim (Alemanha), Londres (Inglaterra), Copenhaga (Dinamarca), Hong Kong (China) e Cidade do Cabo (África do Sul).

Para cada localidade serão realizados simulações com os elementos estruturais da fracção com os diferentes tipos de betão normal (BN1, BN 2 e BN 3) e leve (BL1, BL 2, BL 3 e BL 4) analisados no Capítulo 3, utilizando alguns resultados da campanha experimental, nomeadamente, a massa volúmica e o coeficiente de condutibilidade térmica dos diferentes tipos de betão em estado seco e saturado. Nas presentes simulações não foi colocada qualquer correcção térmica nos elementos estruturais, pelo que as soluções dos elementos estruturais não são regulamentares, porque apenas se pertendia obter valores das necessidades energéticas para efeito comparativo dos diferentes betões.

.

4.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO *ENERGY PLUS*

O *EnergyPlus* é um *software* desenvolvido para permitir o estudo e análise de edifícios do ponto de vista do seu comportamento e desempenho energético. Neste estudo a versão utilizada foi a *EnergyPlus* 8.1. O *EnergyPlus* foi desenvolvido pelo *US Department of Energy*, a partir de programas já existentes, o *Blast* e o DOE-2, em linguagem *Fortran 90*. É uma ferramenta que permite determinar as necessidades energéticas de aquecimento (Inverno) e de arrefecimento (Verão) de um edifício, permitindo a introdução de inúmeros parâmetros e condições de utilização do edifício (Ernest, 2009).

O *software EnergyPlus* calcula a carga térmica de um edifício e permite, entre outros resultados, obter a quantidade de energia necessária para que a temperatura ambiente interior se mantenha próxima da temperatura de conforto pré-definida. Permite ainda prever, entre outros, as temperaturas ambiente interior e superficiais, fluxos de calor, consumos de energia, níveis de iluminação e caudais de ventilação.

Uma grande vantagem no estudo do desempenho térmico de edifícios com o recurso ao *EnergyPlus*, é a capacidade deste *software* fazer simulações em intervalos de tempo definidos pelo utilizador e apresentar resultados com frequências que podem ser inferiores a uma hora. A introdução dos dados pode ser realizada num editor de texto específico do *EnergyPlus*, em formato IDF (*Input Date File*). Os parâmetros são introduzidos através do *IDF-Editor* e estão organizados em grupos e dentro destes encontram-se um ou mais campos de entrada, os quais possuem objetos.

O *EP-Launch* permite modelar o edifício no próprio programa e dispõe de uma funcionalidade de detecção de erros que se torna crucial no processo de modelação. Após concluir a simulação, o programa fornece um ficheiro que descreve os eventuais erros detetados pelo *software* (Ernest, 2009).

Nas Figuras 4.2 e 4.3 apresentam-se os programas *IDF-Editor* e *EP-Launch*. O programa *IDF-Editor* permite definir os parâmetros e os campos de entrada e saída da simulação.

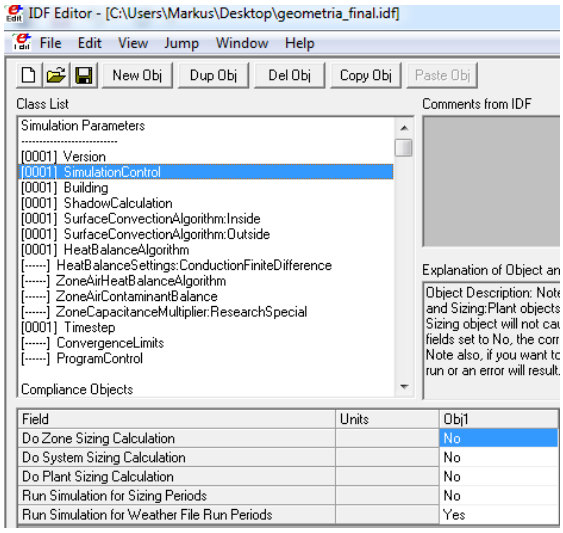


Figura 4.2 - Programa IDF-Editor

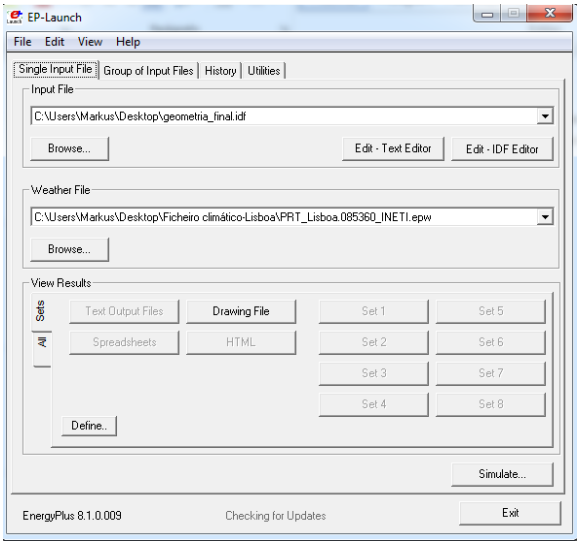


Figura 4.3 - Programa *EP-Launch*

No Quadro 4.1 é apresentado, um esquema representativo dos dados de *Input* e *Output* necessários para uma simulação de comportamento térmico de um edifício.

Quadro 4. 1 – Esquema ilustrativo dos *inputs* e *outputs* das simulações

Input	Output
• *Simulation Parameters* • *Thermal Zones and Surface* • *Location and Climate* • *Weather File* • *Schedules* • *Surface Construtions Elements* • *Internal Gains* • *Zone Airflow* • *HVAC Template*	• Temperatura do ambiente exterior (ºC) • Temperatura do ambiente interior (ºC) • Fluxo de calor (Wh/m^2) • Ganhos e perdas através dos vãos envidraçados (Wh) • Consumo energético na estação de aquecimento (Wh) • Consumo energético na estação de arrefecimento (Wh) • Ganhos internos resultantes de equipamentos (W) • Ganhos de calor por infiltração devido a ventilação (J) • Perdas de calor por infiltração devido a ventilação (J)

Uma desvantagem do programa é a morosidade do processo de definição da geometria do edifício. Para facilitar a introdução desses dados, foi possibilitada nas últimas versões do *EnergyPlus*, a interface com o programa *Google* SketchUp e o *plug-in Open Studio*, que permitem desenhar e definir a geometria do edifício de forma bastante rápida e intuitiva, e preencher alguns campos de entrada com posterior gravação em formato IDF. Na Figura 4.4 apresenta-se a interface do programa *SketchUp* e as barras de ferramentas do *Plug-in OpenStudio*.

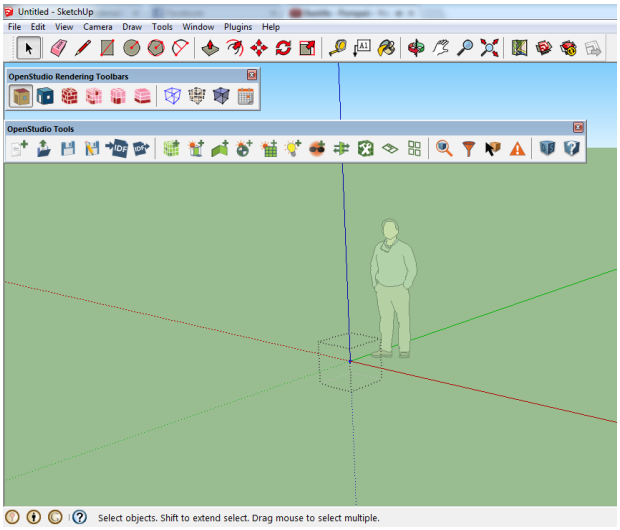

Untitled - SketchUp
File Edit View Camera Draw Tools Window Plugins Help
OpenStudio Rendering Toolbars
OpenStudio Tools
Select objects. Shift to extend select. Drag mouse to select multiple.

Figura 4.4 - Programa *SketchUp* com as barrar do *plug-in Open Studio*

De seguida, pretende-se explicar os campos de entrada no *EnergyPlus* que foram utilizados na elaboração desta dissertação. Tal como já foi mencionado, o programa possui um editor de texto *IDF-Editor* através do qual os dados relativos ao caso de estudo podem ser introduzidos no programa. Esse editor de texto está dividido em grupos e estes, por sua vez, estão divididos em vários campos de entrada (Pereira, 2005).

4.2.1. *Simulation Parameters*

O primeiro grupo de inserção de dados é o *Simulation Parameters*, o qual irá definir diversos parâmetros gerais da simulação, nomeadamente os algoritmos de cálculo, o *time-step* e as definições de convergência das simulações. Na Figura 4.5 apresenta-se o grupo *Simulation Parameters* e todos os campos utilizados.

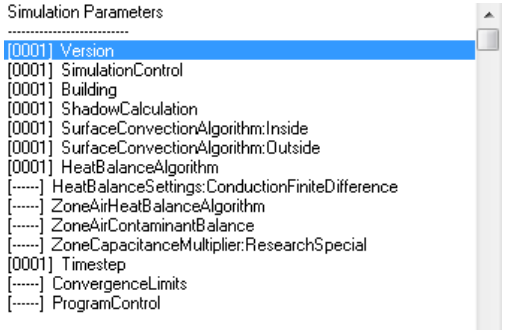


Figura 4.5 – Grupo *Simulation Parameters*

4.2.1.1. Version

Foi utilizada a versão mais recente do *EnergyPlus* – versão 8.1.

4.2.1.2. Simulation Control

O *Simulation Control* permite escolher o tipo de simulação pretendida. Foi definido que a simulação irá apenas utilizar o ficheiro climático e num dado período de tempo de simulação – *Run Simulation for Weather File Run Periods: Yes*.

4.2.1.3. Building

Um dos campos de entrada com maior relevância é o *Building* que permite definir de forma detalhada o edifício e o local inserido. É possível atribuir um nome para o edifício (*Building Name)*, definir a sua orientação solar em relação ao Norte verdadeiro (*North Axis)* e definir a rugosidade do terreno (*Terrain)*. No presente trabalho definiu-se a rugosidade do terreno como cidade (*city)* e que será utilizada na contabilização da influência do vento, já que o edifício se encontra inserido num ambiente urbano ou centro urbano.

O campo *Solar Distribution* define o algoritmo de distribuição solar que caracteriza a forma como a radiação é refletida pela superfície exterior, e como é refletida ou absorvida a radiação através dos envidraçados, a opção escolhida de *Full Interior and Exterior*, em que o programa assume que a

radiação solar absorvida pelos elementos no interior do edifício depende da absortância dos mesmos e tem em consideração todos os sombreamentos.

O *Warmup* tem o objetivo de assegurar a convergência da simulação. Para os parâmetros de convergência das cargas térmicas e da temperatura, em *Loads Convergence Tolerance Value* admitiu-se um desvio máximo de 0,04 W e em *Temperature Convergence ToleranceValue* admitiu-se um desvio máximo de 0,4°C.

O número de dias mínimo e máximo para o *Warmup, Minimum Number of Warmup Days e Maximum Number of Warmup Days,* foram de 6 e 25, respetivamente.

4.2.1.4. Shadow Calculation

No *shadow calculation* foram utilizados os valores por defeito do programa. O método de cálculo escolhido para controlar as sombras através do movimento solar foi *Average Over Days In Frequency* (Frequência média durante os dias) – com uma frequência de cálculo de 20 dias. Significa que neste intervalo de tempo serão usados valores médios da posição do sol e da área de superfície exposta à radiação solar.

4.2.1.5. Surface Convection Algorithm: Inside and Outside

No campo *Surface Convection Algorithm: Inside* permite controlar o modelo de cálculo para as trocas de calor por convecção do interior de todas as superfícies. Foi usado o modelo por defeito do programa TARP que correlaciona as trocas de calor com a diferença de temperatura.

À semelhança do campo anterior, o campo *Surface Convection Algorithm: Outside* controla o modelo de cálculo para as trocas de calor por convecção do exterior de todas as superfícies e foi escolhido o modelo DOE-2.

4.2.1.6. Heat Balance Algorithm

No campo *Heat Balance Algorithm* define-se o tipo de algoritmo para o controlo da transferência de calor e difusão do vapor de água através de todos os elementos construtivos. Foi utilizado o *Conduction Tranfer Function* (CTF).

4.2.1.7. Timestep

O campo *Timestep* representa o número que define os passos-de-tempo em que são realizados os cálculos numa hora. Para a simulação apresentar passos-de-tempo suficientes para a estabilização do modelo foi escolhido o valor por defeito de 6.

4.2.2. *Location and Climate*

No grupo *Location and Climate*, será apenas preenchido o campo *Run Period* que corresponde ao período de simulação.

4.2.2.1. Run Period

O período de simulação é definido em *Run Period*, onde se introduz a data de início e fim da simulação. Em todos os casos de estudo, os períodos de simulação utilizados foram correspondentes a um ano. Foi definido que será repetido uma vez o período de simulação em todas as simulações (*Number of Times Runperiod to be Repeated:* 1). Na Figura 4.6 apresentam-se os campos de entrada preenchidos no *Run Period* utilizado para todos os casos de estudo.

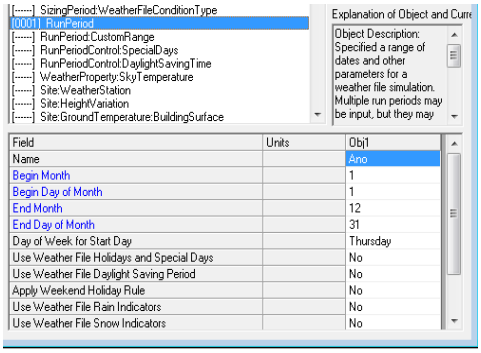


Figura 4.6 – Campos de entrada do *Run Period*

4.2.3. *Schedule*

A utilização do grupo *Schedule* possibilita calendarizar todos os processos que envolvam o modelo de simulação. Foram definidos o horário de utilização em que o edifício está ocupado e o horário de funcionamento do ar condicionado. Em todas as simulações, o horário de ocupação e de funcionamento do ar condicionado adoptado foi de 24 horas por dia, por se tratar de um edifício habitacional.

Na Figura 4.7 apresentam-se todos os campos de entrada deste objeto que serão preenchidos e caracterizados para o calendário.

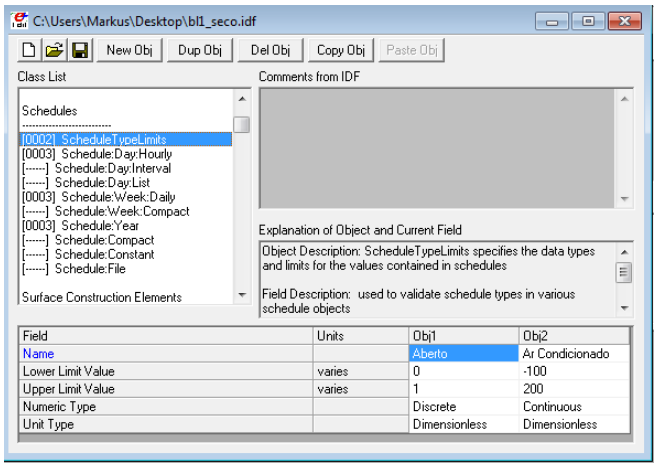


Figura 4.7 – Objeto *Schedule*

4.2.3.1. Schedule Type Limits

No campo *Schedule Type Limits* são definidos o nome, os valores limites e o tipo numérico para cada tipo de calendarização. O horário de ocupação é definido com o nome “Aberto” e terá como limites 0 e 1, em que 0 significa que está fechado e 1 que se encontra ocupado. Já as temperaturas do Ar Condicionado terão como limite -60ºC e 200ºC, de modo a englobarem uma grande gama de temperaturas.

4.2.3.2. Schedule: Day: Hourly

O campo Schedule: *Day:* Hourly define o dia tipo, ou seja, o horário ao longo das 24 horas do dia, em que os tipos de calendários funcionam e no caso do sistema de climatização o valor a que opera, ou seja, as temperaturas *setpoint* no período de aquecimento e arrefecimento.

Para o dia tipo do horário de abertura optou-se pelo nome “Aberto” e colocou-se 1 em todas as horas, conforme já mencionado, por se tratar de um edifício habitacional que se considera ocupado durante todo o dia. Para o sistema de climatização no período de Inverno, deu-se o nome de “Aquecimento” e colocou-se o valor de 18 que representa a temperatura *setpoint* em graus celsius. No período de Verão deu-se o nome de “Arrefecimento” e definiu-se o valor de 25 que representa também a temperatura *setpoint* em graus celsius. Estas temperaturas de setpoint são as consideradas no Regulamento da Térmica (REH, 2013), respectivamente para as estações de aquecimento e arrefecimento.

4.2.3.3. Schedule: Week: Daily

No campo *Schedule: Week: Daily* será definido uma semana tipo, com a indicação dos dias em que cada dia tipo funcionará. Cada dia tipo será associado a uma semana tipo. Definiu-se para a semana do horário de ocupação “Aberto”, para o ar condicionado “Aquecimento” no período de Inverno e “Arrefecimento” no período de Verão.

4.2.3.1. Schedule: Year

No objeto *Schedule: Year* será definido um ano tipo. Cada ano tipo terá que corresponder a um ano completo mesmo que o período de simulação não seja a totalidade do ano, caso contrário a simulação resulta em erro. Cada semana tipo será associada a um ano tipo.

No ano tipo o horário de ocupação foi denominado “Aberto” e o sistema de climatização “AC Aquecimento” em regime de aquecimento e “AC Arrefecimento” em regime de arrefecimento.

4.2.4. Surface Constrution Elements

Este grupo baseia-se na definição dos materiais e das soluções construtivas da envolvente exterior e interior do edifício, onde são caracterizados os pavimentos, paredes, coberturas, portas e janelas.

4.2.4.1. Material

A definição da envolvente inicia-se com a caracterização de todos os materiais opacos existentes no campo *Material*, que posteriormente serão utilizados no grupo *Construction* para a definição da constituição das soluções construtivas. Para cada elemento criado será necessário preencher os campos com as suas respectivas propriedades mecânicas e físicas, nomeadamente: a rugosidade (*Roughness*) que varia desde muito rugoso (*Very Rough*) a muito liso (*Very Smooth*); a espessura (*Thickness*) do material na direção perpendicular à camada em metro, o calor específico (*Specific heat*); a condutibilidade térmica (*Condutivity*); a massa volúmica (*Density*) e a absorptância térmica, solar e visível (*Thermal absorptance*, *Solar abosorptance* e *Visible absorptance*). Na Figura 4.8 é apresentado o campo *Material* e os respectivos parâmetros de preenchimento.

Os valores de coeficiente de condutibilidade térmica (*Conductivity*) e de massa volúmica (*Density*) dos betões da envolvente exterior do edifício serão preenchidos de acordo com os resultados da campanha experimental (Capítulo 3).

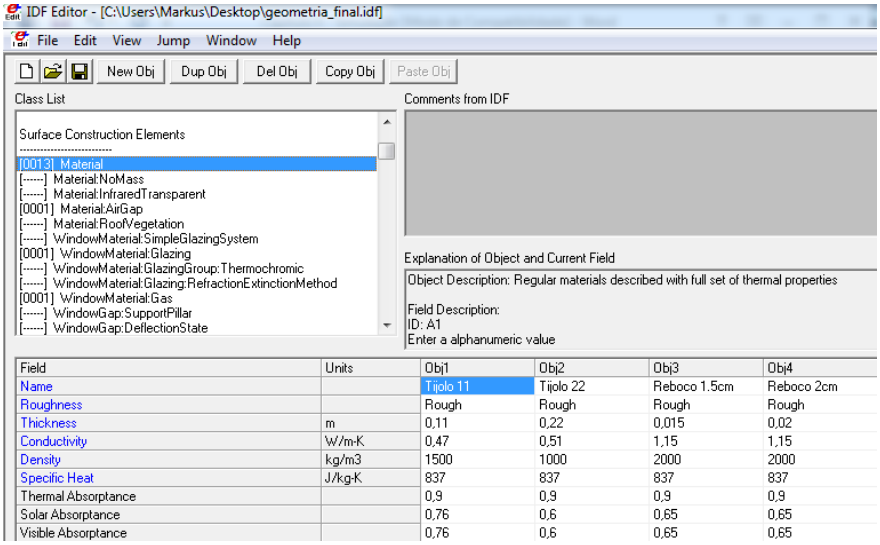


Figura 4.8 – Campos de entrada do *Material*

4.2.4.2. Material: AirGap

O campo Material: *Air Gap* é utilizado para caracterizar os espaços vazios entre dois materiais opacos e será usado no presente trabalho para caracterizar o espaço de ar entre a laje e o teto falso. A resistência térmica do ar utilizada foi de 0,15 m^2K/W.

4.2.4.3. Window Material: Glazing e Blind

No campo *Window Material: Glazing* são definidas as características dos vãos envidraçados. O tipo de vão envidraçado utilizado foi o vidro duplo constituído por dois vidros simples de 4mm separados por 12 mm de caixa-de-ar. Para as características do vidro simples pode recorrer-se à base de dados disponível na pasta *Data Set* do programa.

4.2.4.4. Window Material: Blind

A protecção solar do vão envidraçado é definida no campo *Window Material:Blind*. No presente trabalho, considera-se que a protecção solar é composta por estores venezianos metálicos de cor branca. As características necessárias para definir a protecção solar são: orientação das lâminas (*slat orientation*); largura das lâminas (*slat width*); separação entre as lâminas (*slat separation*); espessura das lâminas (*slat thickness*); ângulo das lâminas (slat angle); condutibilidade térmica das lâminas (*slat conductivity*); transmitância solar directa e difusa e visível directa e difusa das lâminas (*slat beam solar, difuse solar, beam visible and diffuse visible transmittance*); refletância solar directa e difusa e visível directa e difuso da face interior e da face exterior das lâminas (*front and back side slat beam solar, difuse solar, beam visible and diffuse visible reflectance*); distância entre o estore veneziano e o vão envidraçado (*blind to glass distance*).

As restantes definições são preenchidas automaticamente pelo *EnergyPlus* e todos os valores que dizem respeito aos diversos espectros de radiação, disponíveis na pasta *Data Set* do programa

4.2.4.5. Constrution

Após a definição dos materiais é possível caracterizar os vários elementos construtivos. Os elementos são compostos por camadas de materiais e ordenados do exterior para o interior do edifício (Figura 4.9).

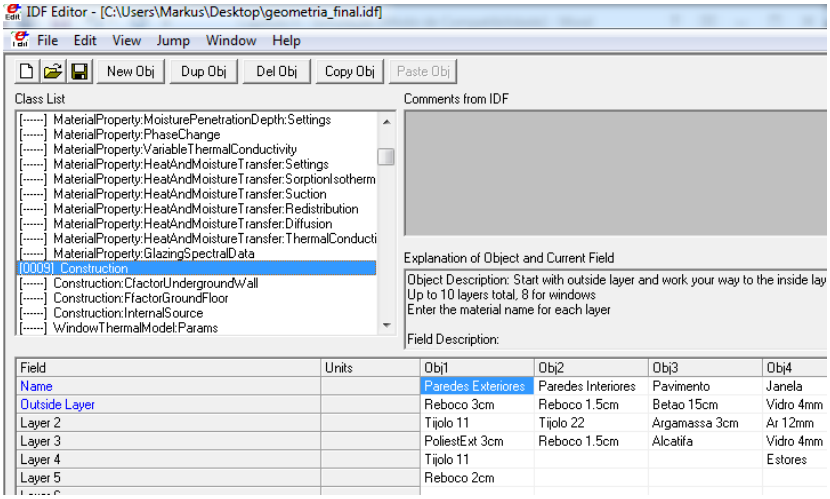


Figura 4.9 – Constituição dos elementos construtivos no campo *Construction*

4.2.5. *Thermal Zones and Surfaces*

O grupo *Thermal Zones and Surface* é responsável pela definição das características geométricas do edifício e da zona ou zonas térmicas. Conforme já referido, a introdução de dados das características geométricas foi realizada através do programa *Google SkectchUp* e do *plug-in Open Studio*.

Na Figura 4.10, apresenta-se a geometria da fracção autónoma introduzida no *Google SketchUp*, que posteriormente foi exportada para um ficheiro IDF do *EnergyPlus* onde introduziu os restantes dados das simulações.

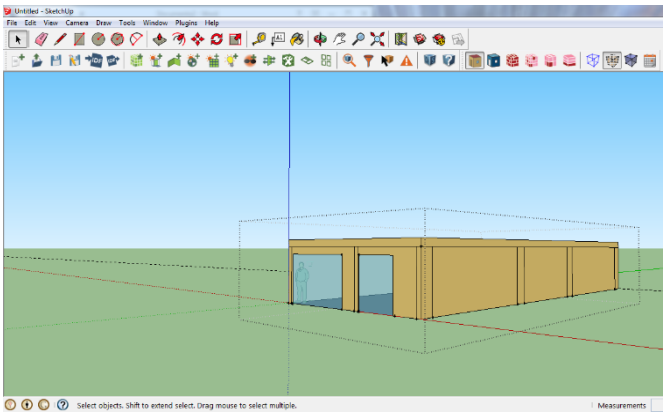


Figura 4.10 – Geometria da fracção autónoma no *SketchUp*

No programa *SketchUp* foram inseridos os nomes de cada superfície e introduzidas as características geométricas de modo a serem identificadas corretamente no *IDF-Editor*.

4.2.5.1. Global Geometry Rules

O campo *Global Geometry Rules* define as regras geométricas utilizadas dos vértices de cada superfície através do sistema de coordenadas (*Coordinate System*) e da ordem de numeração (*Starting Vertex Position* e *Vertex Entry Direction*).

4.2.5.2. Zone

O campo *Zone* permite a criação de zonas térmicas que são definidas por um volume onde a temperatura interior é constante. Nesta dissertação apenas será criada uma única zona caracterizada pelo nome “Zona” e que corresponde a todo o espaço da fracção autónoma em estudo.

4.2.5.3. Building Surface: Detailed

As superfícies são caracterizadas no campo *Building Surface: Detailed*, sendo que alguns campos de entrada são preenchidos no *Google SketchUp*, com o nome da superfície, tipo de cobertura, condição de fronteira exterior, exposição solar e ao vento, sendo as restantes editadas no *IDF-Editor* (Figura 4.11).

Na barra de ferramentas do *plug-in Open Studio* no Google *SkecthUp*, após selecionar a superfície desenhada e selecionar o botão *Inspector*, aparece um conjunto de dados referentes à geometria definida, sendo possível modificar o nome das superfícies (*Name*) de modo a serem identificadas mais facilmente no *EnergyPlus.*

A condição de fronteira (*Outside Boundary Condition*) dos elementos construtivos será Adiabática (*Adiabatic*) para as lajes, e para as paredes de separação entre fogos do edifício e entre o fogo e a caixa de escada, esta condição implica que não haverá transferência de calor nestas superfícies. Para as paredes exteriores da envolvente do edifício, a condição de fronteira é exterior (*Outdoors*).

As superfícies exteriores caracterizam como tendo exposição solar e ao vento (*Sun Exposure* e *Wind Exposure*), enquanto as superfícies adiabáticas não têm nenhum desse tipo de exposição (*No Sun* e *No Wind*). Cada elemento está associado a uma zona térmica (*Zone Name*) e um tipo de construção (*Constrution Name*).

Para além destes parâmetros, cada superfície é caracterizada pelas coordenadas da localização dos vértices (*Vertex coordinate*) da respectiva superfície que foi definido do *Google SkecthUp.*

[0031] BuildingSurface:Detailed
[-----] Wall:Detailed

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4	Parede 5
Surface Type		Wall	Wall	Wall	Wall	Wall
Construction Name		Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores
Zone Name		Zona	Zona	Zona	Zona	Zona
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object						
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground						
Number of Vertices						
Vertex 1 X-coordinate	m	0,2	4,35	7,4	7,4	7,4
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0	0,6	6,9	11,7
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Vertex 2 X-coordinate	m	0,2	4,35	7,4	7,4	7,4
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	0,6	6,9	11,7
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	4,15	7,2	7,4	7,4	7,4
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	0	6,3	11,1	17,4
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0
Vertex 4 X-coordinate	m	4,15	7,2	7,4	7,4	7,4
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	0	6,3	11,1	17,4
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

energy+.idd | EnergyPlus 8.1.0.009 | Parede 1

Figura 4.11 – Campos de entrada de *Building Surface: Detailed*

4.2.5.4. Window Property: Shading Control

O objeto *Window Property: Shading Control* é responsável pela definição da calendarização do sistema de protecção dos vão envidraçados (Figura 4.12), sendo necessário definir os seguintes parâmetros:

- *Name* - O nome do controlo da protecção escolhido foi “SolarControl”;
- *Shading Type* - O tipo de sombreamento dos vãos envidraçados é exterior;
- *Shading Control Type* - O tipo de controlo da protecção utilizado é *On If High Outdoor Air* com *Set point* de 25ºC.

No campo de entrada *Shading Device Material Name* indica-se o tipo de protecção dos vãos envidraçados definidos no objeto *Window Material: Blind*, referente aos estores venezianos metálicos. Para que a protecção solar fique activa no intervalo caracterizado em *Shading Control Type* e *Set point*; é necessário activar no objeto *Fenestration Surface: Detailed* o nome da calendarização do sistema de protecção dos vãos envidraçados “Solar Control”. A proteção solar é activada sempre que a temperatura exterior ultrapassar os 25º C.

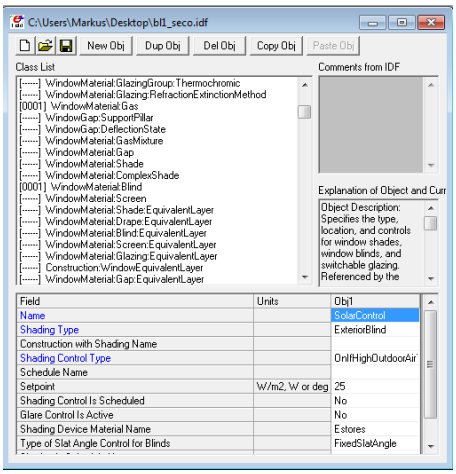


Figura 4.12 - Campos de entrada de *Window Property: Shading Control*

4.2.5.4. Fenestration Surface: Detailed

No campo *Fenestration Surface: Detailed* são especificados os vãos envidraçados, que são definidos como sub-superfícies. São definidos os seguintes parâmetros (Figura 4.13):

- *Name* – nome da superfície proveniente do *Google SketchUp*;
- *Surface Type* – tipo de superfície;
- *Constrution Name* – nome do tipo de construção que representa a constituição da janela criada em *Constrution*;
- *Building Surface Name* – nome da superfície onde a sub-superfície se encontra:
- *Shading Control Name* – nome da calendarização do sistema de protecção dos vãos envidraçados definido em *Window Property: Shading Control*;
- *Vertex* coordinate - coordenadas geométricas da localização dos vértices da respectiva sub-superfície proveniente do *Google SkecthUp.*

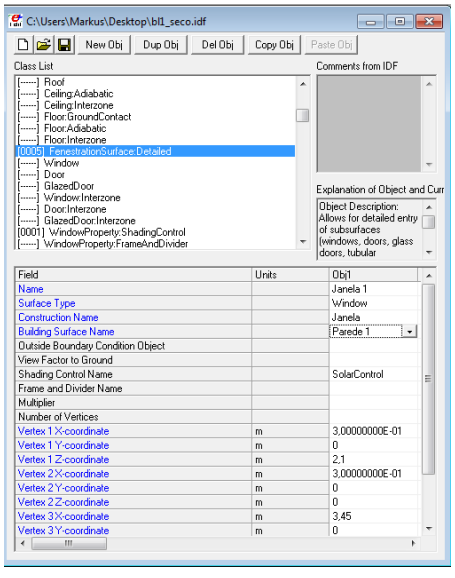


Figura 4.13 – Campos de entrada do objeto *Fenestration Surface: Detailed*

2.6. *Internal Gains*

Os ganhos internos incluem qualquer fonte de calor, resultante da ocupação humana, equipamentos e dispositivos de iluminação. O único campo preenchido é *Light*, onde se coloca a estimativa dos ganhos internos. Neste estudo, o valor utilizado foi de 4 W/m^2, que corresponde ao valor indicado pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH, 2003) para edifícios residenciais. Na Figura 4.14 representa-se o campo dos ganhos internos.

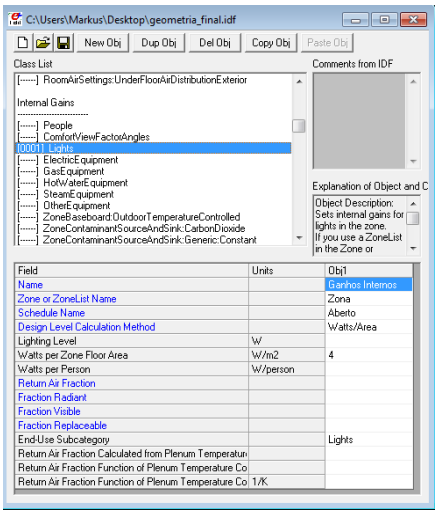


Figura 4.14 – Preenchimento do campo *Light* no objeto *Internal Gain*

4.2.7. *Zone Airflow*

A ventilação natural desempenha um factor importante no balanço energético dos edifícios, uma vez que a renovação de ar e as necessidades de aquecimento e arrefecimento sofrem alterações. No Verão, a ventilação é benéfica para a qualidade do ar e a manutenção de uma temperatura de conforto dos edifícios. Por outro lado, no Inverno, a ventilação é desfavorável contribuindo para existência de perdas de calor adicionais. O campo utilizado para indicar o caudal de ventilação foi *Zone Ventilation: Design Flow Rate* (Figura 4.15)

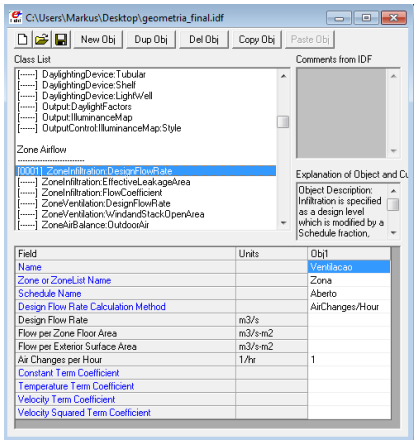


Figura 4.15 - Preenchimento do objeto Ventilation: Design Flow Rate

Esta ventilação é regulada por valores mínimos, definindo o REH (2013) um valor mínimo de taxa de renovação por hora de 0,6 Rph. Todas as simulações estudadas estão em conformidade com este regulamento tendo sido utilizado o valor de 1 Rph.

4.2.7. *HVAC Templates*

No grupo *HVAC Template* é definido o funcionamento do ar-condicionado através do calendário do "Ar Condicionado" (*Schedule*), onde foi definido o horário e as temperaturas de funcionamento. No objeto *HVAC Template: Thermostat* é definido o termostato associado aos calendários de arrefecimento e aquecimento (Figura 4.16).

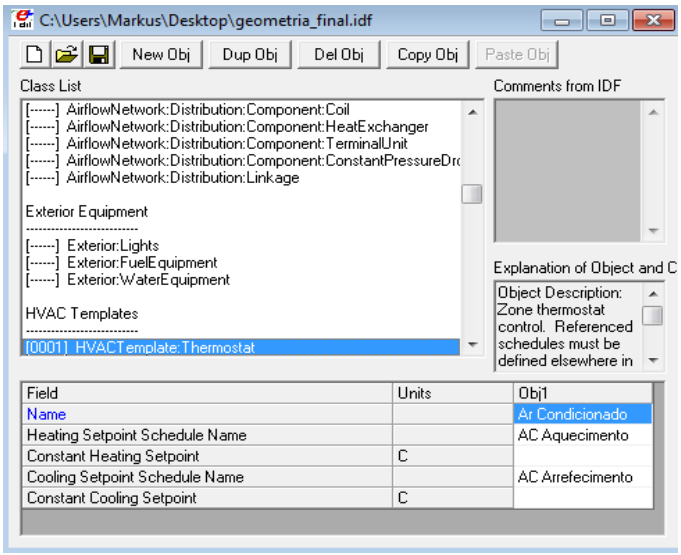


Figura 4.16 - Objeto *HVAC Template Thermostat*

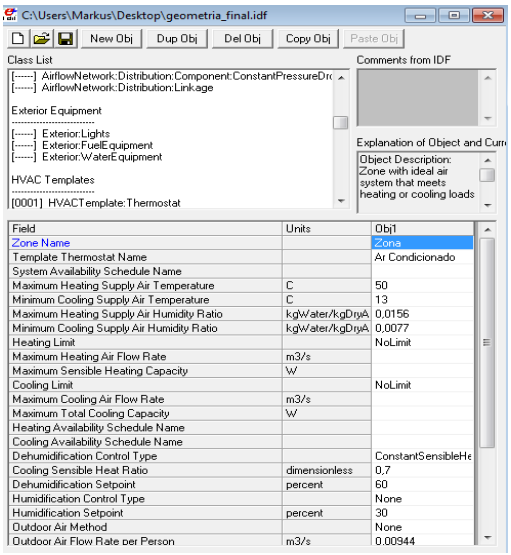


Figura 4.17 - Objeto HVAC Tempate Zone Ideal Loads Air System

No objeto *HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System* é associado o termostato criado ao sistema de ar condicionado. Os restantes parâmetros foram preenchidos por defeito pelo programa, apresentando-se na Figura 4.17 os campos de entrada preenchidos.

4.2.8. *Output Reporting*

Os *outputs* que serão utilizados e analisados em todas as simulações são os seguintes:

- Temperatura do ambiente exterior (ºC) – *Site Outdoor Air Drybulb Temperature*;
- Temperatura do ambiente interior (ºC) – *Zone Mean Air Temperature*;
- Ganhos de calor através dos vãos envidraçados (W) – *Zone Windows Total Heat Gain Rate;*
- Perdas de calor através dos vãos envidraçados (W) - *Zone Windows Total Heat Loss Rate;*
- Fluxo de calor pelas superfíces opacas (W/m^2) – *Surface Inside Face Conduction Heat Transfer Rate per Area*;
- Consumo energético na estação de aquecimento (W) – *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Rate;*
- Consumo energético na estação de arrefecimento (W) – *Zone Ideal Loads Supply Air Total Cooling Rate;*

- Ganhos internos resultantes de equipamentos (W) – *Zone Lights Total Heating Rate;*
- Ganhos de calor por infiltração devido a ventilação (J) – *Zone Infiltration Sensible Heat Gain Energy;*
- Perdas de calor por infiltração devido a ventilação (J) - *Zone Infiltration Sensible Heat Loss Energy.*

4.2.9. *Weather File*

O ficheiro climático é introduzido no *EP-Launch* no momento da simulação no formato EPW (*EnergyPlus Weatherfiles*) e está disponível no sítio da Internet *Weather Files* do *EnergyPlus*.

Os ficheiros climáticos apresentam, entre outros, os valores horários dos seguintes parâmetros:

- coordenadas geográficas: latitude e longitude;
- altitude;
- temperatura ambiente exterior;
- humidade relativa;
- radiação total que incide num plano horizontal à superfície do terreno;
- direção e velocidade do vento.

4.3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste subcapítulo será analisado o caso de estudo no que diz respeito ao consumo energético e às trocas de calor pela envolvente exterior. Será realizada uma comparação de resultados para os diferentes tipos de betão normais e leves e diferentes localidades.

4.3.1. Análise do consumo energético

A análise do consumo energético tem o objetivo de comparar os resultados e verificar quais são os tipos de betão que apresentam melhor comportamento térmico. O comportamento térmico de um edifício depende de vários factores, principalmente das condições climáticas da localidade e das propriedades térmicas dos elementos da envolvente.

Serão analisados os consumos energéticos para os diferentes tipos de betão normais e leves ensaiados no Capítulo 3, nas estações de Verão e Inverno de cada localidade e que representam respectivamente as necessidades energéticas de arrefecimento e aquecimento. Uma vez que as reais estações de aquecimento e arrefecimento podem ser mais do que os três meses das estações de Inverno e Verão, foi considerado o período de Inverno entre 21 de Dezembro e 20 Março e o período de Verão entre 21 de Junho e 22 de Setembro nas localidades do hemisfério Norte, já as localidades do hemisfério Sul foi considerado o período de Inverno entre 21 de Junho e 22 de Setembro e o período de Verão entre 21 de Dezembro e 20 Março. Também serão analisados as necessidades energéticas de arrefecimento e aquecimento anual.

Nas figuras 4.18 e 4.19 apresentam-se os consumos energéticos da fracção autónoma com os elementos estruturais constituídos pelos diferentes tipos de betão por área útil de pavimento, nas estações de Inverno e Verão para as diferentes localidades de Portugal, respectivamente.

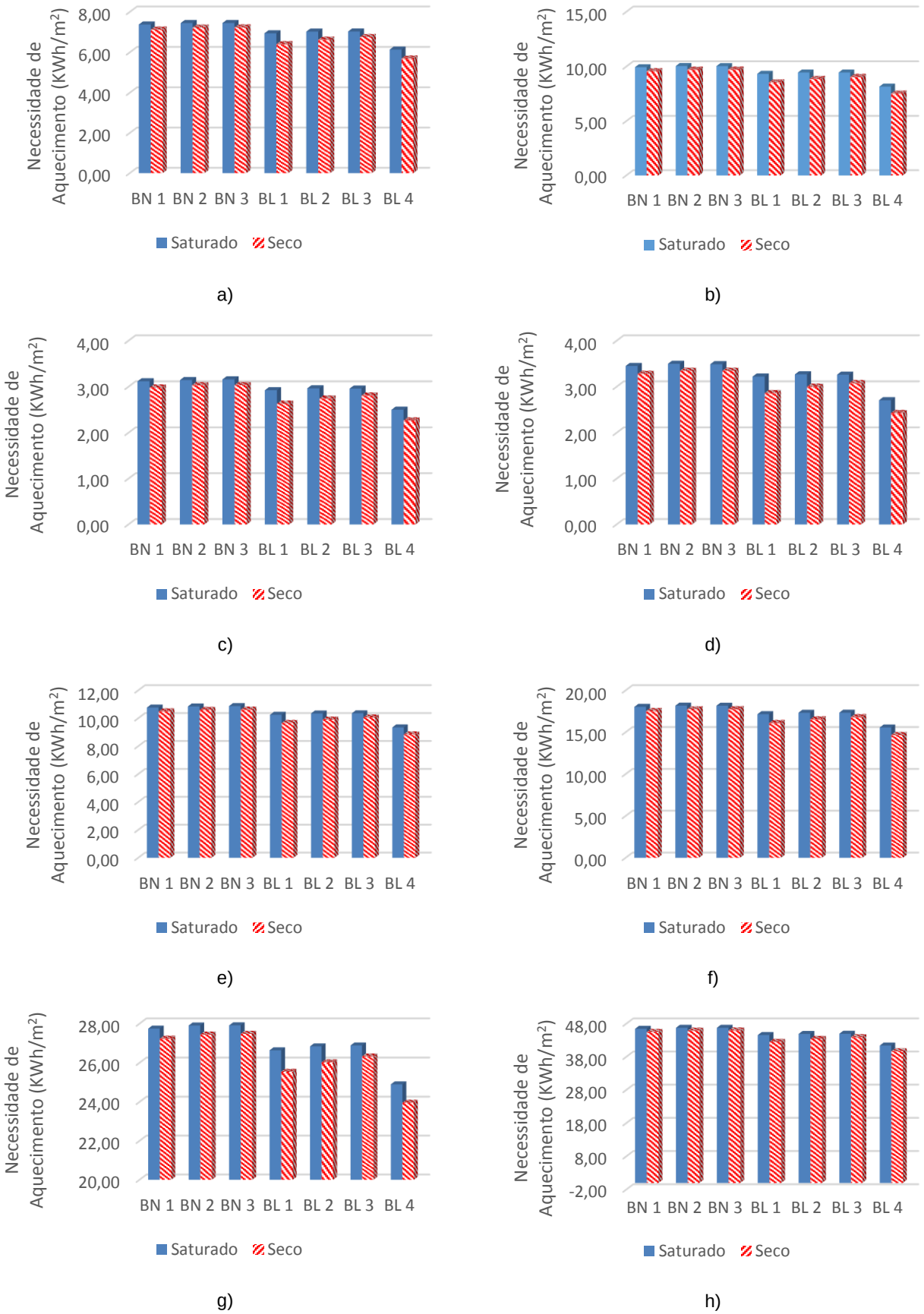
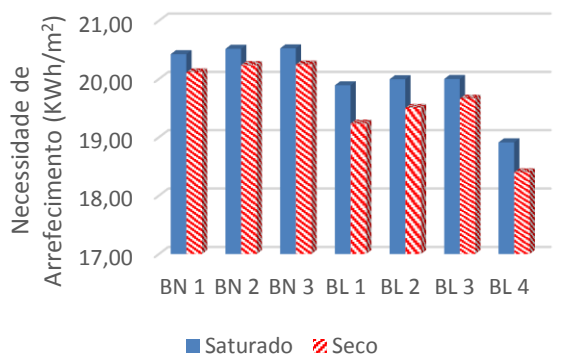
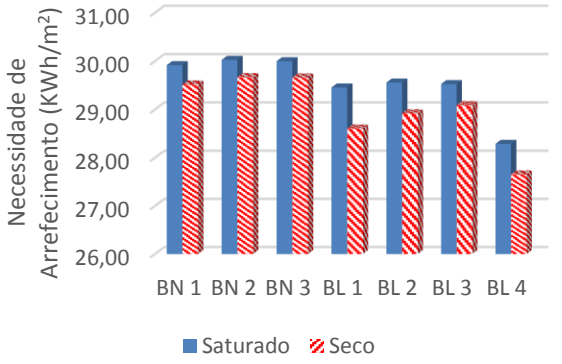


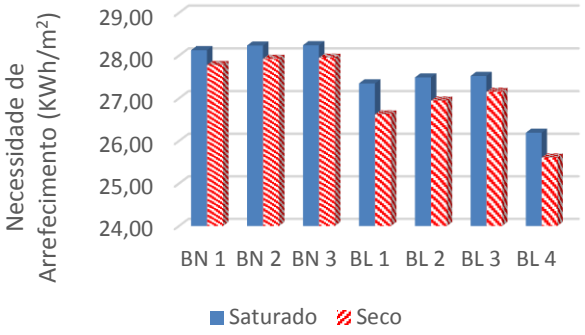
Figura 4.18 - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento de Portugal a) Lisboa no período de Inverno; b) Lisboa no período anual; c) Faro no período de Inverno; d) Faro no período anual; e) Porto no período de Inverno; f) Porto no período anual; g) Bragança no período de Inverno; h) Bragança no período anual.



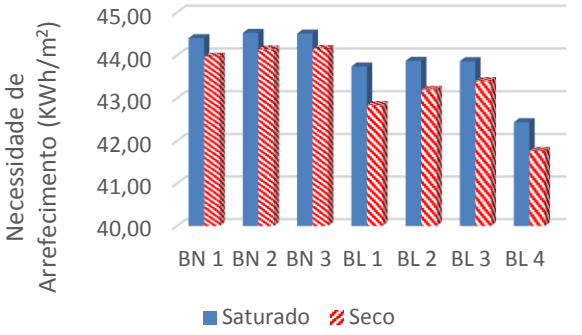
a)



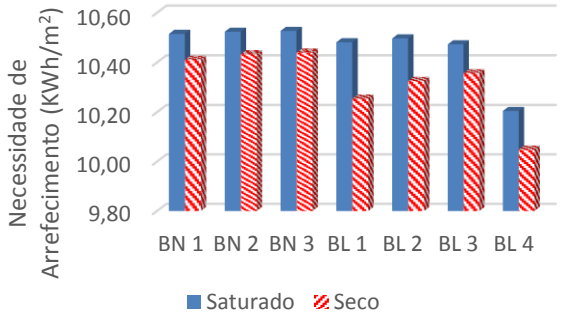
b)



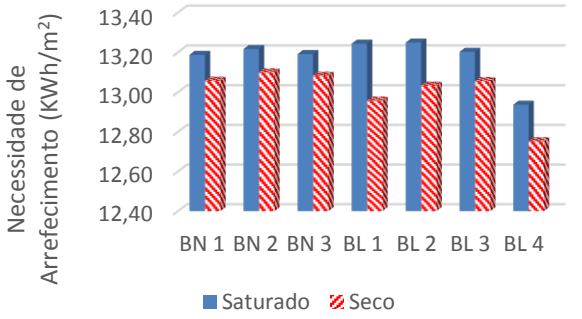
c)



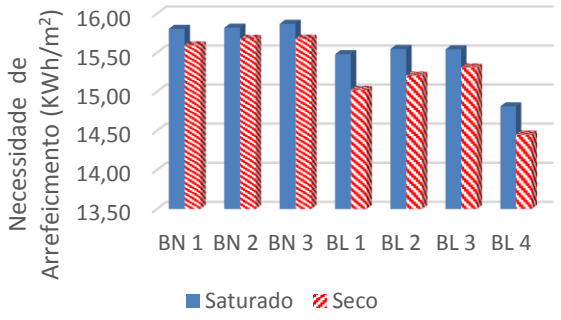
d)



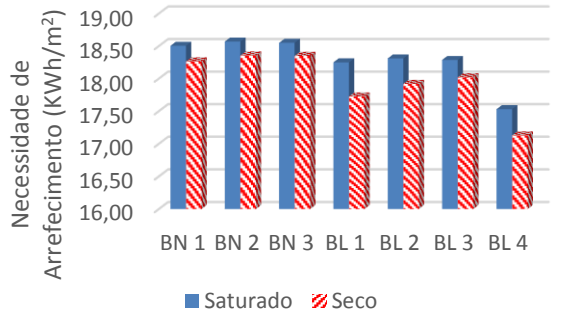
e)



f)



g)



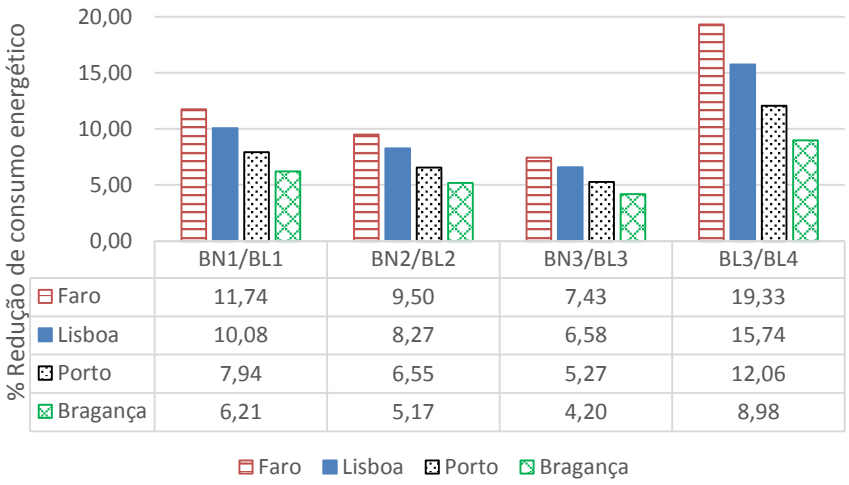
h)

Figura 4.19 - Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de Portugal a) Lisboa no período de Verão; b) Lisboa no período anual; c) Faro no período de Verão; d) Faro no período anual; e) Porto no período de Verão; f) Porto no período anual; g) Bragança no período de Verão; h) Bragança no período anual.

Pela análise dos resultados indicados nas Figuras 4.18, constata-se que as necessidades energéticas para o mesmo tipo de betão são menores em estado seco do que saturado, o que se justifica pelo menor valor do coeficiente de condutibilidade térmica dos provetes secos face aos saturados, independentemente do período analisado. De acordo com o FIB (1983), o coeficiente de condutibilidade térmica é proporcional ao teor de humidade. Nas localidades nacionais analisadas, verifica-se que os consumos energéticos dos betões normais são sempre superiores em relação aos dos betões leves de composição semelhante. Entre os betões leves, o BL 4 foi o que apresentou menores consumos energéticos por ser também aquele que tem um menor valor de coeficiente de condutibilidade térmica. À medida que aumenta a massa volúmica (de BL 1 para BL 3), como esperado e confirmado experimentalmente no Capítulo 3, a condutibilidade térmica aumenta e as necessidades energéticas também aumentaram (Figuras 4.18 e 4.19).

Em Portugal (Figura 4.18 a, c, e, g), as necessidades energéticas de aquecimento no período de Inverno utilizando o coeficiente de condutibilidade térmica do betão dos elementos estruturais em estado seco, apresentam os maiores valores para a cidade de Bragança entre 27,23 e 27,48 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 23,96 e 26,33 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve, representando, em média, 4 vezes as necessidades energéticas de aquecimento de Lisboa. O Porto apresenta, em média, uma necessidade energética de aquecimento 50% superior à de Lisboa, enquanto a cidade de Faro apresenta os menores valores de necessidades energéticas de aquecimento, entre 2,98 e 3,04 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 2,27 e 2,81 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve, que representa, em média, 41% das necessidades energéticas de aquecimento de Lisboa. Como seria de esperar, as localidades com as condições climáticas mais severas no período de Inverno, apresentam maiores consumos energéticos de aquecimento.

A Figura 4.20 apresenta a percentagem de redução de consumo energético de aquecimento ao se utilizar o betão leve em vez de um betão normal de composição semelhante.



	BN1/BL1	BN2/BL2	BN3/BL3	BL3/BL4
Faro	11,74	9,50	7,43	19,33
Lisboa	10,08	8,27	6,58	15,74
Porto	7,94	6,55	5,27	12,06
Bragança	6,21	5,17	4,20	8,98

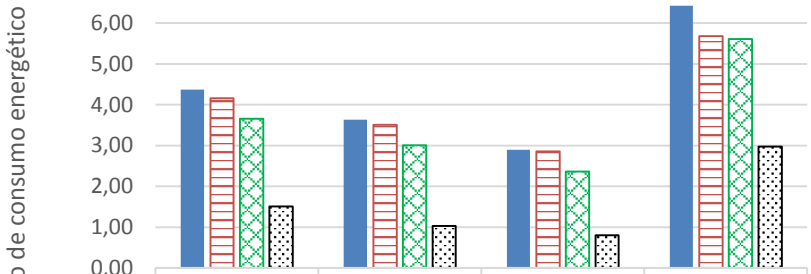
Figura 4. 20 - Percentagem de redução das necessidades energéticas de aquecimento entre o betão leve e normal de composição semelhante e entre BL 3 e BL 4.

Verifica-se que Faro é a localidade nacional com maiores percentagens de redução de consumos energéticos e Bragança a cidade com as menores percentagens de redução de consumos energéticos

no período de Inverno. No entanto, ao analisar as localidades pelos valores absolutos de poupança de consumo energético, verifica-se que Bragança é a localidade com as maiores poupanças entre os betões leves e normais de composição semelhante e entre BL 3 e BL 4, sendo Faro a localidade com os menores valores absolutos de poupança de consumos energéticos. Em Faro onde as necessidades energéticas são mais pequenas, qualquer variação tem maior impacto na variação percentual.

Relativamente às necessidades energéticas de arrefecimento no período de Verão (Figura 4.19 a, c, e, g), a cidade de Faro apresenta os maiores valores entre 27,78 e 27,95 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal, e entre 25,61 e 27,15 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve, representando em média 38% a mais do que as de Lisboa. As cidades de Bragança e do Porto apresentam aproximadamente 78% e 52% das necessidades energéticas de arrefecimento de Lisboa. Como seria de esperar, as localidades com as condições climáticas mais severas no período de Verão, apresentam-se com maiores consumos energéticos de arrefecimento.

A Figura 4.21 apresenta a percentagem de redução de consumo energético de arrefecimento da fracção autónoma com a solução de betão leve em comparação com a solução de betão normal de composição semelhante.

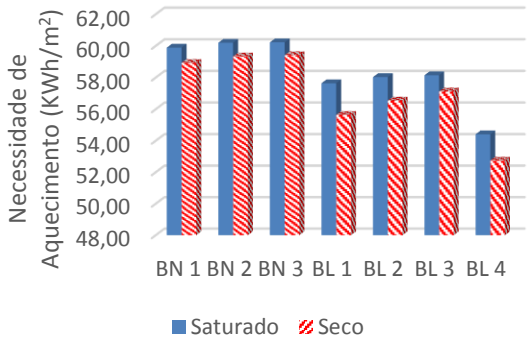


	BN1/BL1	BN2/BL2	BN3/BL3	BL3/BL4
Lisboa	4,37	3,63	2,89	6,42
Faro	4,16	3,50	2,86	5,68
Bragança	3,66	3,00	2,36	5,61
Porto	1,51	1,03	0,80	2,97

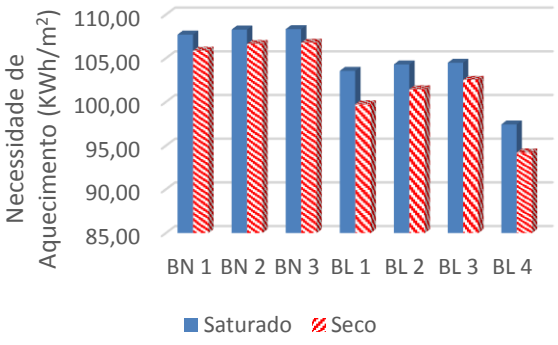
Figura 4.21 - Percentagem de redução das necessidades energéticas de arrefecimento entre o betão leve e normal de composição semelhante.

Verifica-se que as percentagens de redução de consumo energético de arrefecimento são, em geral, menores do que as de aquecimento e que Lisboa apresenta-se como a localidade nacional com maiores percentagens de redução de consumos energéticos de arrefecimento e o Porto apresenta-se a cidade nacional com as menores percentagens de redução de consumos energéticos no período de Verão, quando se coloca um betão leve em vez de um betão normal de composição semelhante. No entanto, ao analisar as localidades pelos valores absolutos de poupança de consumo energético, verifica-se que Faro é a localidade com as maiores poupanças entre os betões leves e normais de composição semelhante e entre BL 3 e BL 4, em seguida Lisboa, sendo o Porto a localidade com os menores valores absolutos de poupança de consumos energéticos.

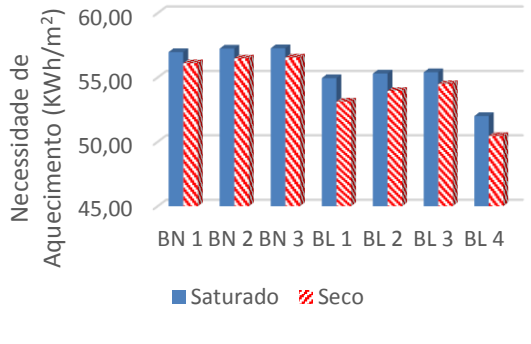
Nas figuras 4.22 e 4.23 apresentam-se, respectivamente, as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento nas cidades europeias de Berlim, Sofia, Copenhaga e Londres.



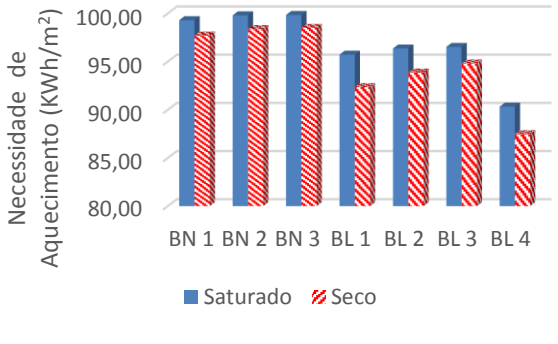
a)



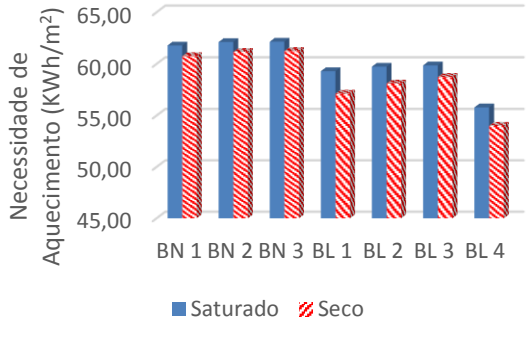
b)



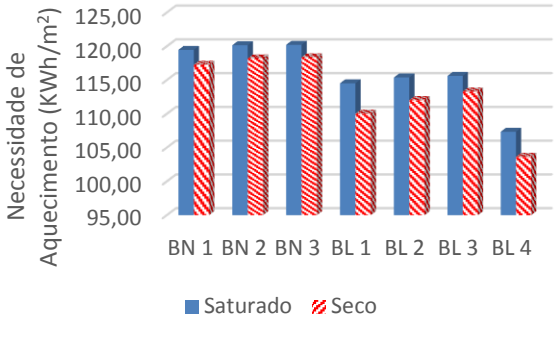
c)



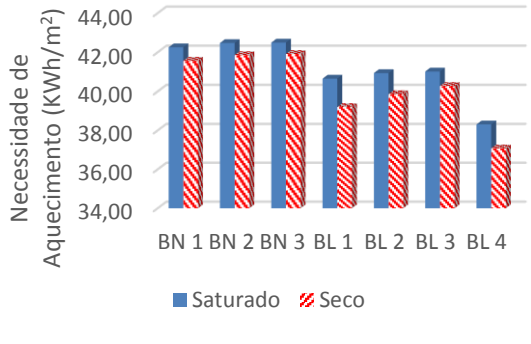
d)



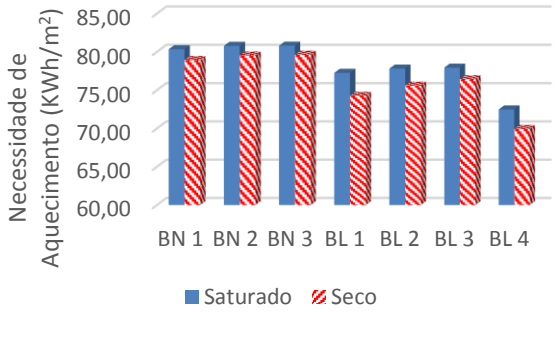
e)



f)

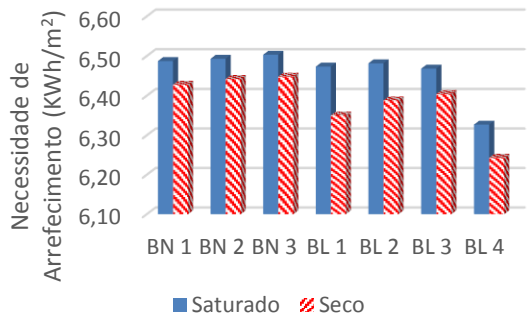


g)

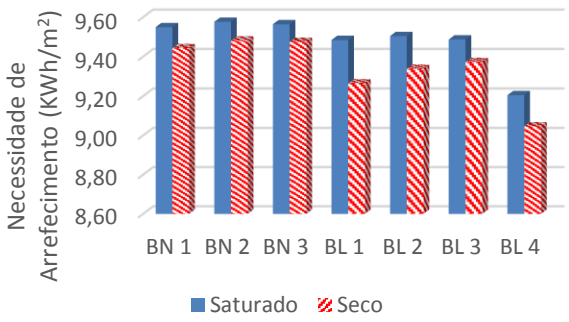


h)

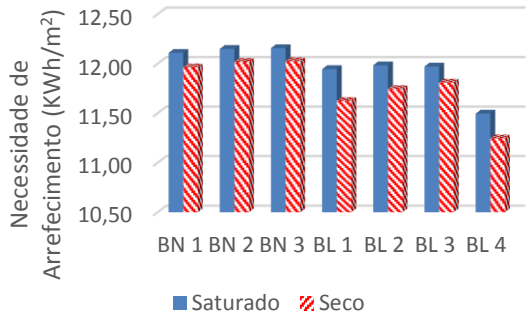
Figura 4.22 - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento para as cidades europeias a) Berlim no período de Inverno; b) Berlim no período anual; c) Sofia no período de Inverno; d) Sofia no período anual; e) Copenhaga no período de Inverno; f) Copenhaga no período anual; g) Londres no período de Inverno; h) Londres no período anual.



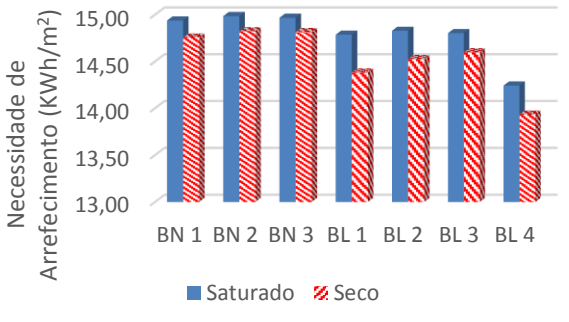
a)



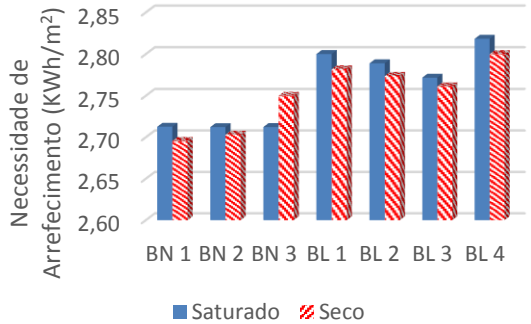
b)



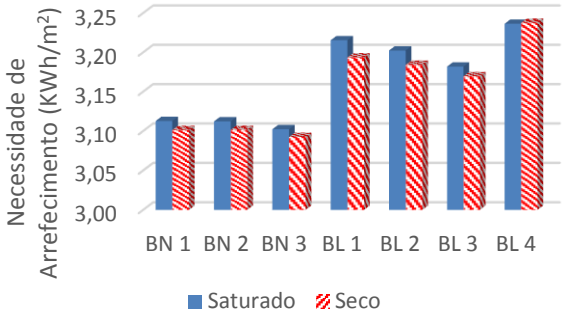
c)



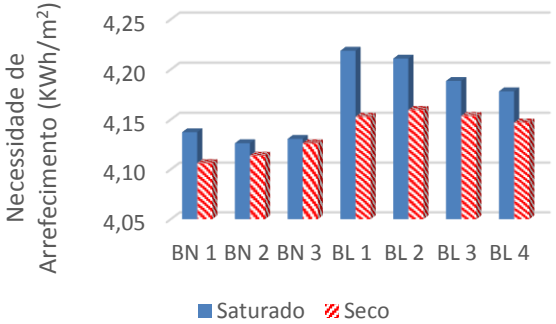
d)



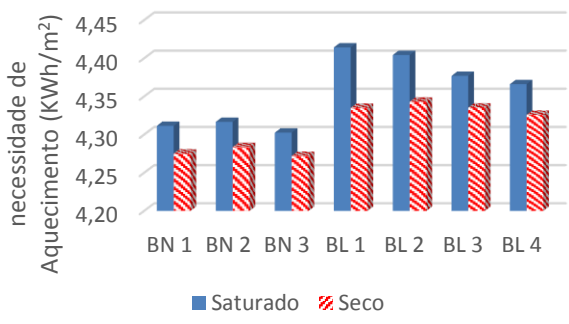
e)



f)



g)



h)

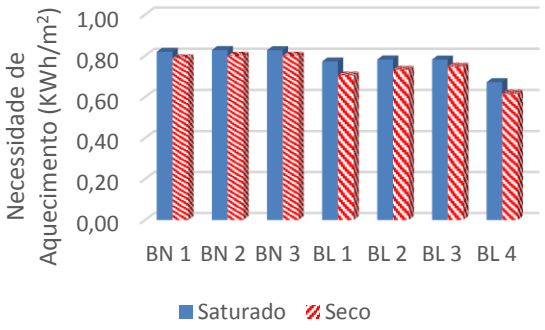
Figura 4.23 - Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento para as cidades europeias a) Berlim no período de Verão; b) Berlim no período anual; c) Sofia no período de Verão; d) Sofia no período anual; e) Copenhaga no período de Verão; f) Copenhaga no período anual; g) Londres no período de Verão; h) Londres no período anual.

Analisando as localidades europeias verifica-se que as necessidades energéticas de aquecimento no período de Inverno utilizando o coeficiente de condutibilidade térmica do betão em estado seco (Figura 4.22), apresentam valores entre entre 41,57 e 41,92 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 37,08 e 40,28 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para a cidade de Londres; entre 56,10 e 56,54 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 50,45 e 54,48 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Sofia, 58,92 e 59,41 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 52,74 e 57,12 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Berlim; e entre 60,75 e 61,25 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 54,00 e 58,73 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Copenhaga, que representa em média cerca de 6,0, 8,1, 8,5 e 8,8 vezes as necessidades energéticas de aquecimento de Lisboa, respetivamente. Copenhaga é a localidade com maior latitude, e logo, apresenta as maiores necessidades energéticas de aquecimento por ter um Inverno mais rigoroso comparativamente com as restantes localidades.

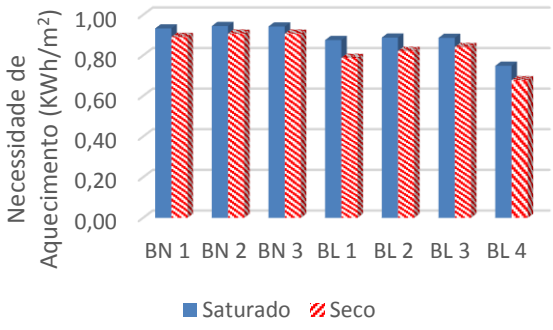
Relativamente às necessidades energéticas de arrefecimento no período de Verão (Figura 4.23), utilizando também os valores do coeficiente de condutibilidade térmica do betão em estado seco, observa-se que os valores variam entre 2,70 e 2,75 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 2,76 e 2,80 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para a cidade de Copenhaga, entre 4,11 e 4,13 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 4,15 e 4,16 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Londres, entre 6,49 e 6,50 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 6,33 e 6,48 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Berlim; e entre 11,96 e 12,02 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 11,25 e 11,81 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Sofia, representando em média cerca de 14%, 21%,32% e 60% das necessidades energéticas de arrefecimento de Lisboa, respetivamente. Este facto, relaciona-se mais uma vez com a latitude dos locais, com a radiação solar e as temperaturas ambientes exterior.

As necessidades energéticas de arrefecimento dos betões leves são, em geral, menores do que os betões normais de composição semelhante, excepto Copenhaga e Londres. As cidades de Copenhaga e Londres apresentam maiores necessidades energéticas de arrefecimento utilizando os betões leves em relação aos betões normais de composição semelhante, o que representa um aumento de consumo energético entre 0,4 e 3,2% para Copenhaga e 0,7 e 1,1% para Londres consoante o tipo de betão. Este facto pode ser explicado pelas menores temperaturas média diária exterior destas duas localidades face às restantes localidades, logo existem, em média, mais perdas de calor pelos elementos da envolvente durante o Verão. Ao se colocar um betão leve mais isolante, estar-se-á a limitar essas perdas de calor e, desde modo, a aumentar as necessidades energéticas de arrefecimento em comparação com os casos com betão normal. No entanto a nível anual, analisando juntamente a estação de aquecimento e arrefecimento, verifica-se que o betão leve conduz assim um melhor desempenho térmico do que os betões normais.

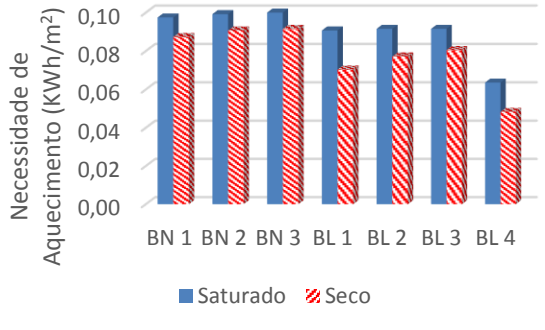
Nas figuras 4.24 e 4.25 apresentam-se, respectivamente, as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento de Hong Kong e das cidades do hemisfério Sul, São Paulo, Cidade do Cabo e Camberra.



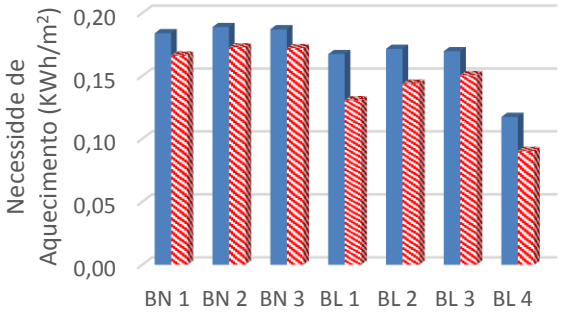
a)



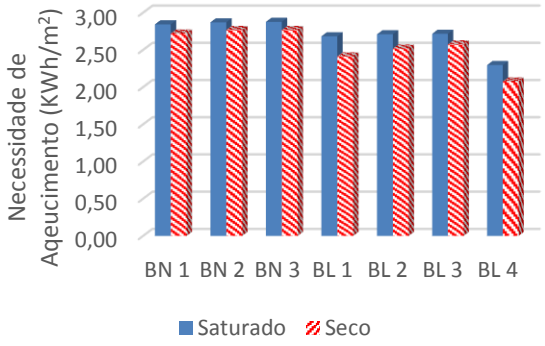
b)



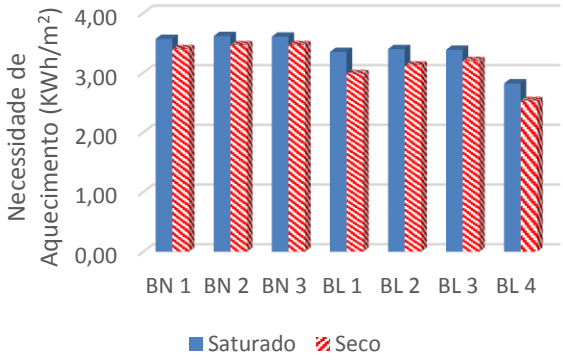
c)



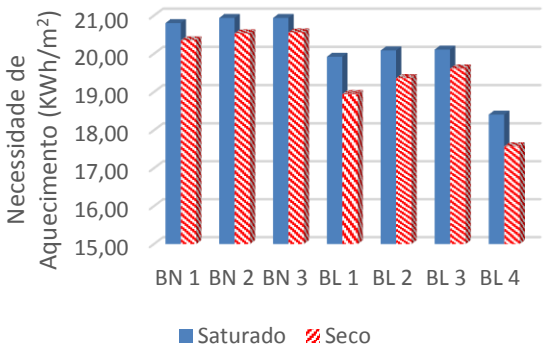
d)



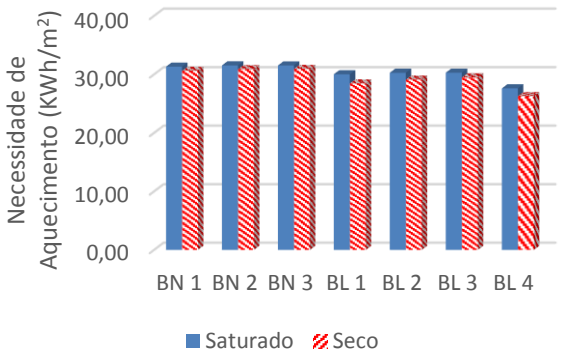
e)



f)



g)



h)

Figura 4.24 - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento para a)Hong Kong no período de Inverno; b) Hong Kong no período anual; e para as cidades do hemisfério Sul c) São Paulo no período de Inverno; d) São Paulo no período anual; e) Cidade do Cabo no período de Inverno; f) Cidade do Cabo no período anual; g) Camberra no período de Inverno; h) Camberra no período anual.

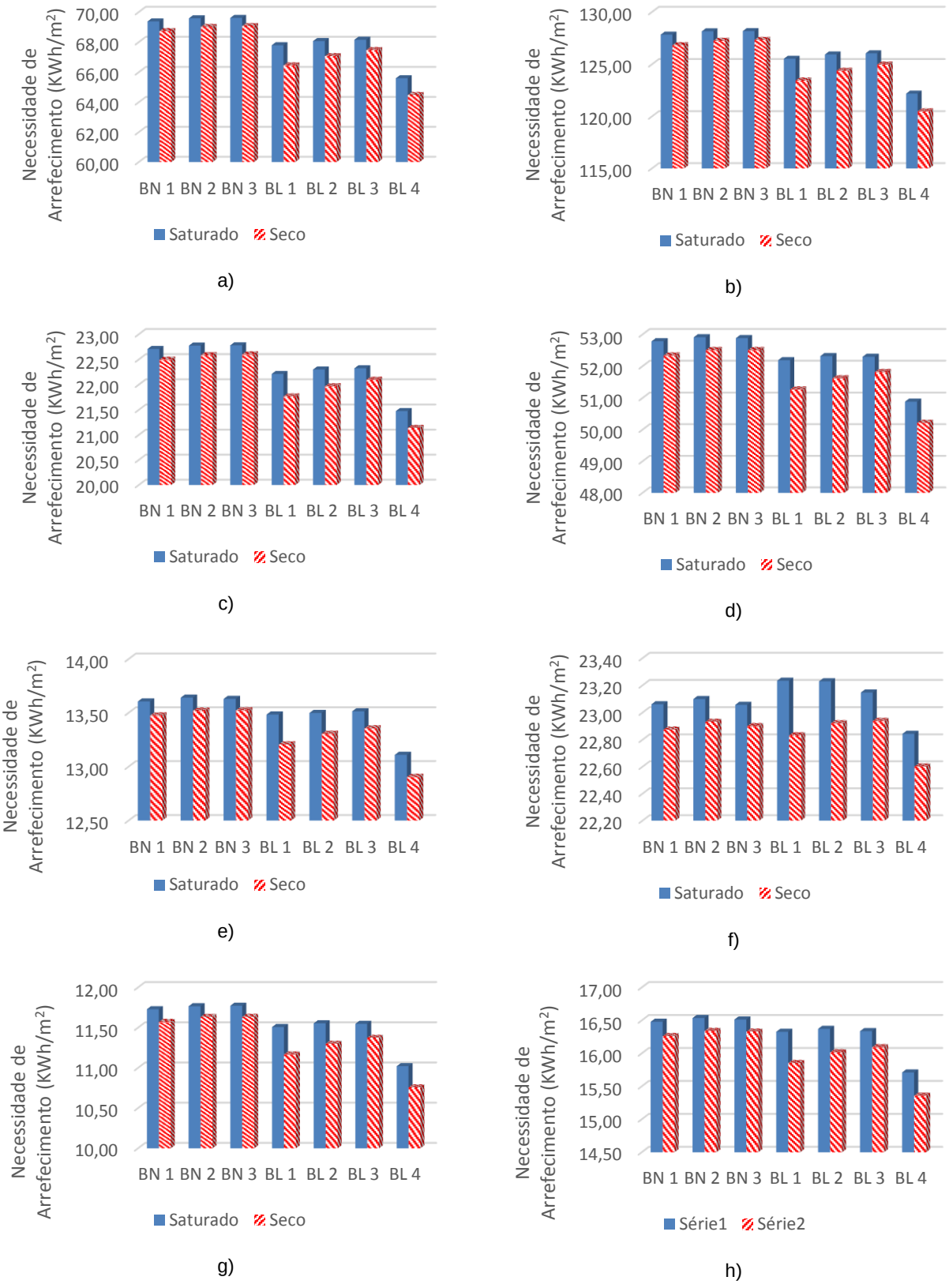


Figura 4.25 - Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento para a)Hong Kong no período de Verão; b) Hong Kong no período anual; e para as cidades do hemisfério Sul c) São Paulo no período de Verão; d) São Paulo no período anual; e) Cidade do Cabo no período de Verão; f) Cidade do Cabo no período anual; g) Camberra no período de Verão; h) Camberra no período anual.

Analisando Hong Kong e as localidades no hemisfério Sul, verifica-se que as necessidades energéticas de aquecimento no período de Inverno, utilizando o coeficiente de condutibilidade térmica do betão em estado seco, apresentam valores entre 0,09 kWh/m^2 para todos os tipos de betão normal e entre 0,06 e 0,09 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para a cidade de São Paulo; entre 0,79 e 0,80 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 0,62 e 0,75 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Hong Kong, e entre 2,72 e 2,77 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 2,08 e 2,57 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para a Cidade do Cabo consoante o tipo de betão, que representa em média cerca de 1%, 11% e 38% das necessidades energéticas de aquecimento de Lisboa, respetivamente. A cidade de São Paulo apresenta as menores necessidades energéticas de aquecimento porque se localiza na zona tropical onde o Inverno é menos rigoroso, comparativamente com as restantes localidades.

A cidade de Camberra, na Austrália, apresenta um comportamento diferente em relação às outras localidades do hemisfério Sul. As necessidades energéticas de aquecimento no período de Inverno apresentam valores entre 20,35 e 20,56 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 17,58 e 19,62 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve, o que representa em média cerca de 2,9 vezes as necessidades energéticas de aquecimento de Lisboa. Tal situação é justificada devido às diferentes condições climáticas, sendo uma cidade com Inverno mais rigoroso por se localizar numa zona subtropical Sul e mais afastada da zona tropical. As temperaturas médias diárias de Camberra no Inverno encontra-se em torno dos 11°C, caindo para temperaturas negativas durante a noite (Bureau of Meteorology, 2013).

Relativamente às necessidades energéticas de arrefecimento no período de Verão, utilizando o coeficiente de condutibilidade térmica do betão em estado seco, os valores situam-se entre 22,50 e 22,60 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 21,14 e 22,10 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para a cidade de São Paulo; e entre 68,74 e 69,07 kWh/m^2 consoante o tipo de betão normal e entre 64,48 e 67,48 kWh/m^2 consoante o tipo de betão leve para Hong Kong, o que representa em média cerca de 1,1 a 3,4 vezes as necessidades energéticas de arrefecimento de Lisboa, respetivamente. As necessidades energéticas de arrefecimento para Cidade do Cabo e Camberra representam em média cerca de 68% e 58% das necessidades de Lisboa, respetivamente.

4.4.2. Análise das trocas de calor

Neste subcapítulo serão analisados as trocas de calor da fracção autónoma com a utilização de betões leves e convencionais de composição semelhante. Serão analisadas as trocas de calor quer no período de Inverno (aquecimento) quer no período de Verão (arrefecimento) para a fracção em estudo localizada em cinco localidades, e logo condições climáticas diferentes: Lisboa, São Paulo, Hong Kong, Copenhaga e Londres. Por simplificação, serão analisados para cada localidade 3 tipos de betão - BN 1, BL 1 e BL 4 -, utilizando o coeficiente de condutibilidade térmica em estado seco.

As trocas de calor do apartamento estão divididas nas seguintes parcelas: ganhos internos; ganhos de calor através dos elementos estruturais de betão da envolvente da fracção autónoma (pilares e vigas) e das restantes partes opacas da envolvente exterior; ganhos de calor por renovação de ar; ganhos

solares e por transmissão pelos vãos envidraçados; perdas de calor pelos vãos envidraçados; perdas de calor através dos elementos estruturais de betão da envolvente da fracção autónoma (pilares e vigas) e das restantes partes opacas da envolvente exterior na estação de Inverno; perdas de calor por renovação do ar.

Na Figura 4.26 apresenta-se o peso percentual na estação de aquecimento, das diferentes parcelas de perdas e ganhos de calor na estação de Inverno, para a localidade de Lisboa.

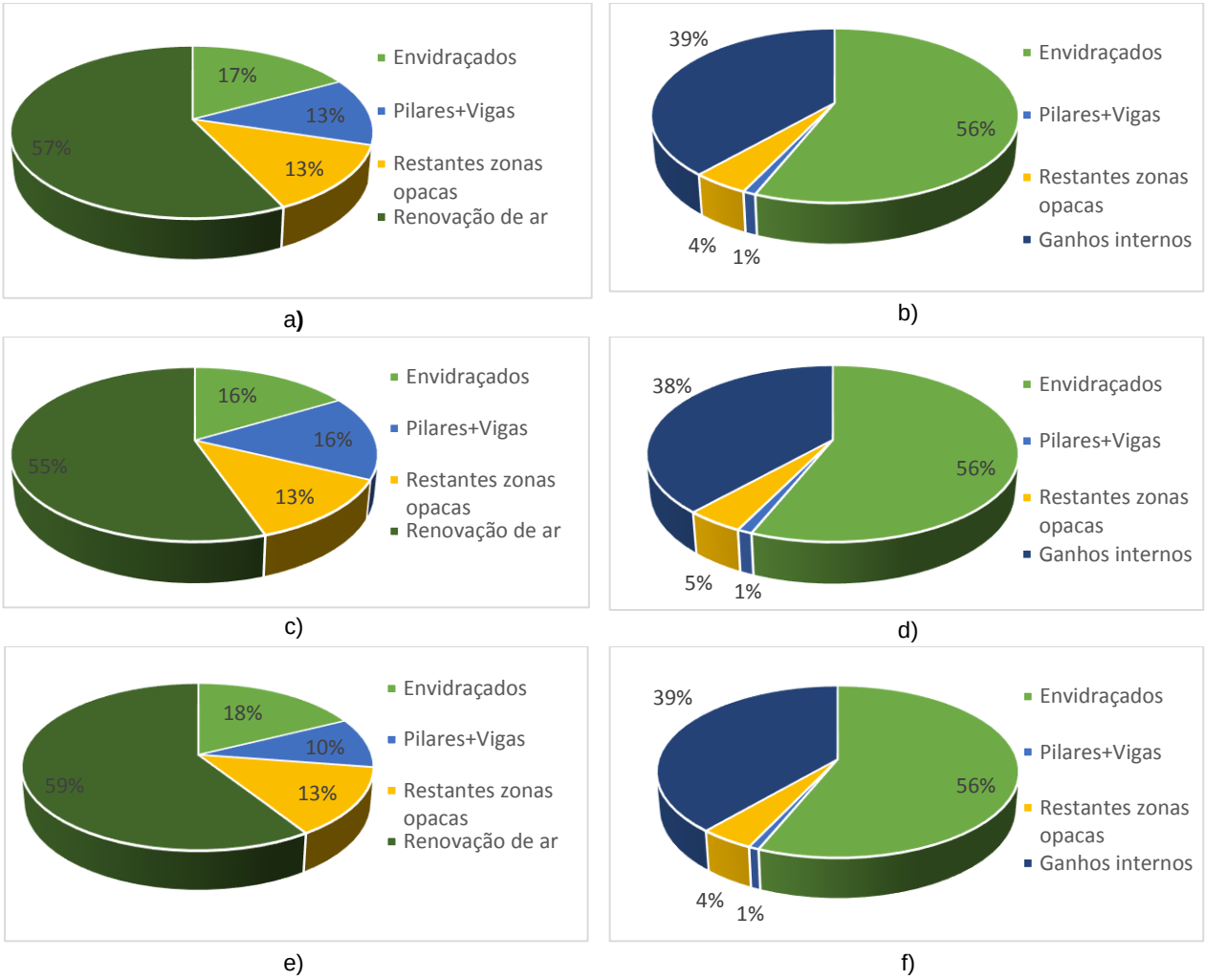


Figura 4.26 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Lisboa a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

Em Lisboa (Figura 4.26 a), c), e)) na estação de aquecimento, o betão leve BL 1 apresenta uma redução no valor da perda de calor através dos elementos estruturais da envolvente exterior de cerca de 21%, o que representa uma poupança na estação de aquecimento superior a 131 kWh em relação ao betão normal de composição semelhante. Ao comparar os betões leves com os betões normais de composição semelhante, verifica-se uma redução da perda de calor da envolvente opaca da fracção autónoma, sendo que a maior redução ocorre na parcela de perda de calor através dos elementos estruturais (pilares e vigas).O betão leve BL 4 comparativamente aos outros betões BN 1 e BL 1, apresenta também uma maior redução da perda de calor da envolvente através dos elementos estruturais, com redução de 258 kWh e 127 kWh respectivamente. Constata-se que tanto a renovação

de ar como as perdas pelos vãos envidraçados têm um peso preponderante nas perdas totais de calor para qualquer tipo de betão analisados.

Nos ganhos de calor na estação de aquecimento (Figura 4.26 b), d), f)) observa-se, independentemente do tipo de betão, uma contribuição significativa dos ganhos internos e principalmente pelos vãos envidraçados, em todos os tipos de betão. A percentagem associada às parcelas de ganhos de calor são semelhantes em todas as soluções. Em relação aos ganhos de calor, os elementos opacos desempenham um papel claramente menor do que os envidraçados. O peso significativo dos ganhos solares pelos vãos envidraçados, deve-se à transmissão directa de radiação solar para o interior, ao contrário dos outros elementos construtivos, que são opacos. Ainda em relação aos ganhos de calor, verifica-se que a renovação de ar não origina ganhos durante à estação de aquecimento, já que a temperatura interior é superior a exterior, durante o período considerado para a referida estação.

Nas Figuras 4.27 e 4.28 apresentam-se o peso percentual na estação de aquecimento, das diferentes parcelas de perdas e ganhos de calor na estação de Inverno, para as cidades europeias, Copenhaga e Londres.

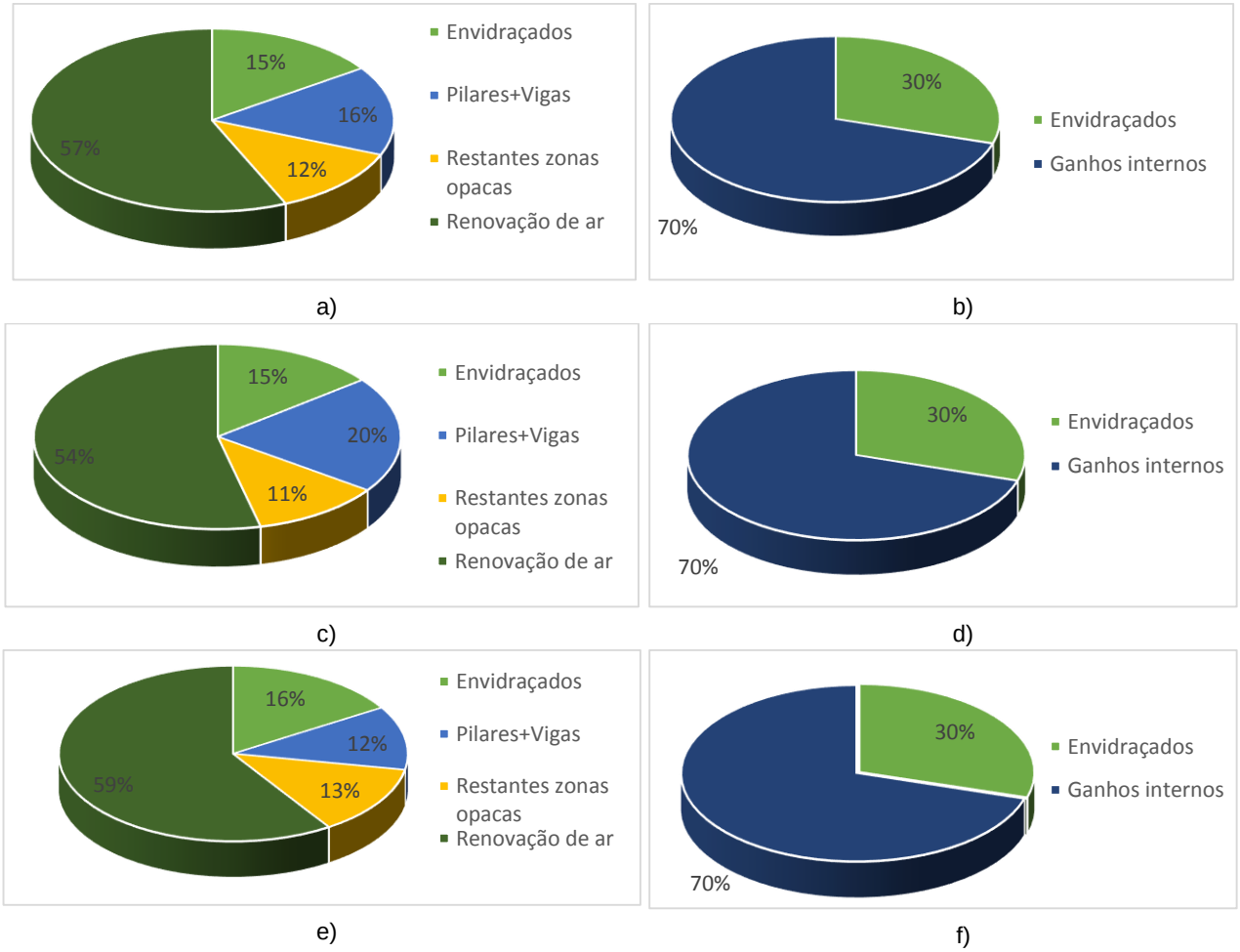


Figura 4.27 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Copenhaga a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

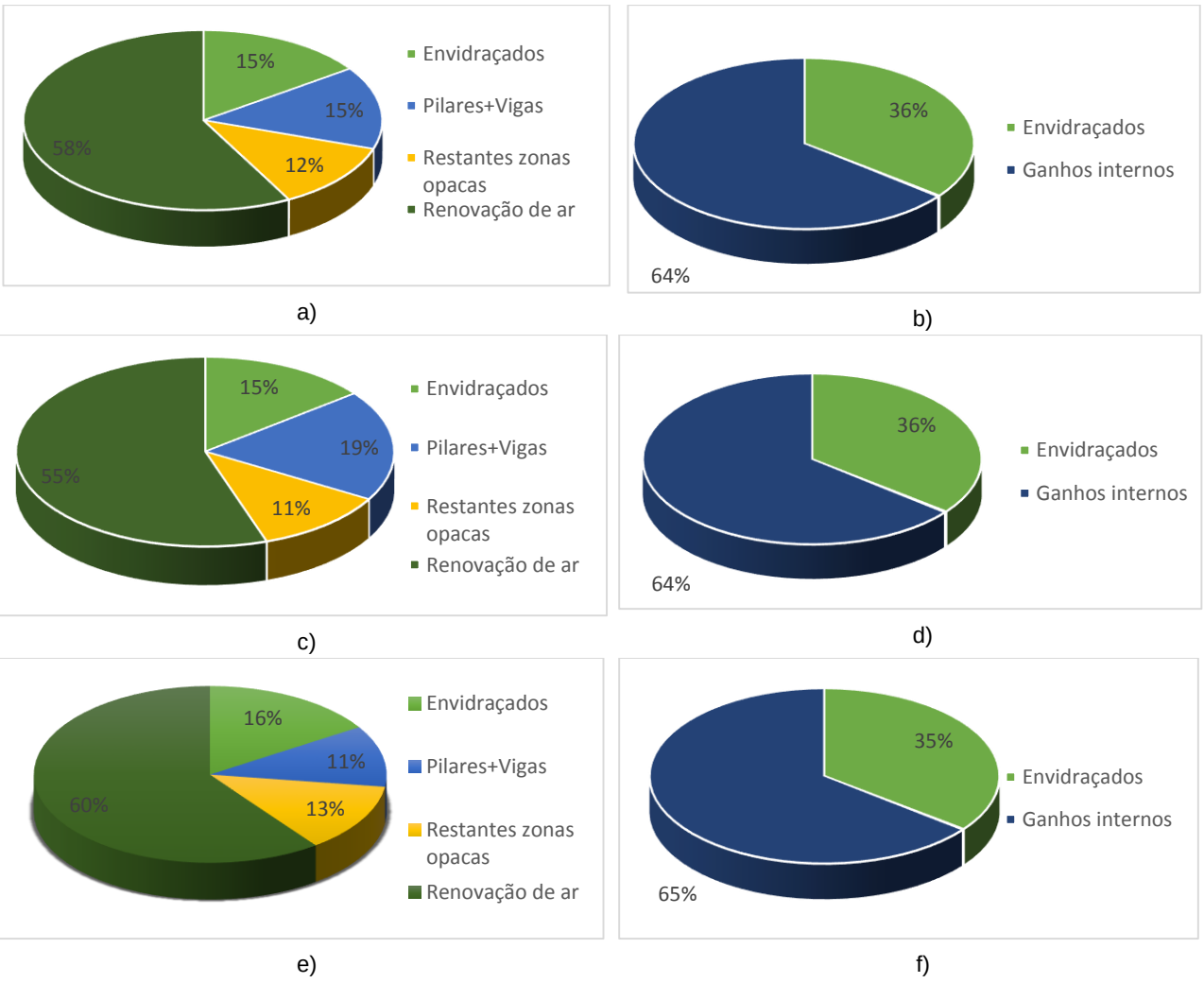


Figura 4.28 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Londres a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

Analisando as Figuras 4.27 a 4.28, constata-se que na estação de aquecimento, as cidades europeias apresentam um peso percentual de perda de calor através da renovação de ar superior a 50%. Tanto a renovação de ar como as perdas pelos vãos envidraçados continuam a ser um peso relevante nas perdas totais de calor para todos os tipos de betão analisados.

Em relação às perdas de calor através dos vãos envidraçados, verificou-se uma redução em termos percentuais nas localidades do hemisfério Norte, Copenhaga e Londres, comparativamente com Lisboa para o mesmo tipo de betão.

As cidades europeias de Copenhaga e Londres, apresentam uma redução no valor da perda de calor através dos elementos estruturais da envolvente de cerca de 26% e 25%, que representa uma poupança de 478 kWh e 321 kWh ao utilizar o betão leve, respectivamente.

Nos ganhos de calor na estação de aquecimento para os diferentes tipos de betão analisados, apresentam praticamente o mesmo peso percentual em todas as suas parcelas. Observa-se também, uma contribuição significativa dos vãos envidraçados e principalmente pelos ganhos internos, em todos os tipos de betão. Independentemente do tipo de betão, Copenhaga e Londres, apresentam cerca de

30% e 36% de ganhos através dos vãos envidraçados e 70% e 64% de ganhos internos, respectivamente

Nas Figuras 4.29 e 4.30 apresentam-se o peso percentual na estação de aquecimento, das diferentes parcelas de perdas e ganhos de calor na estação de Inverno, para as localidades de Hong Kong e São Paulo.

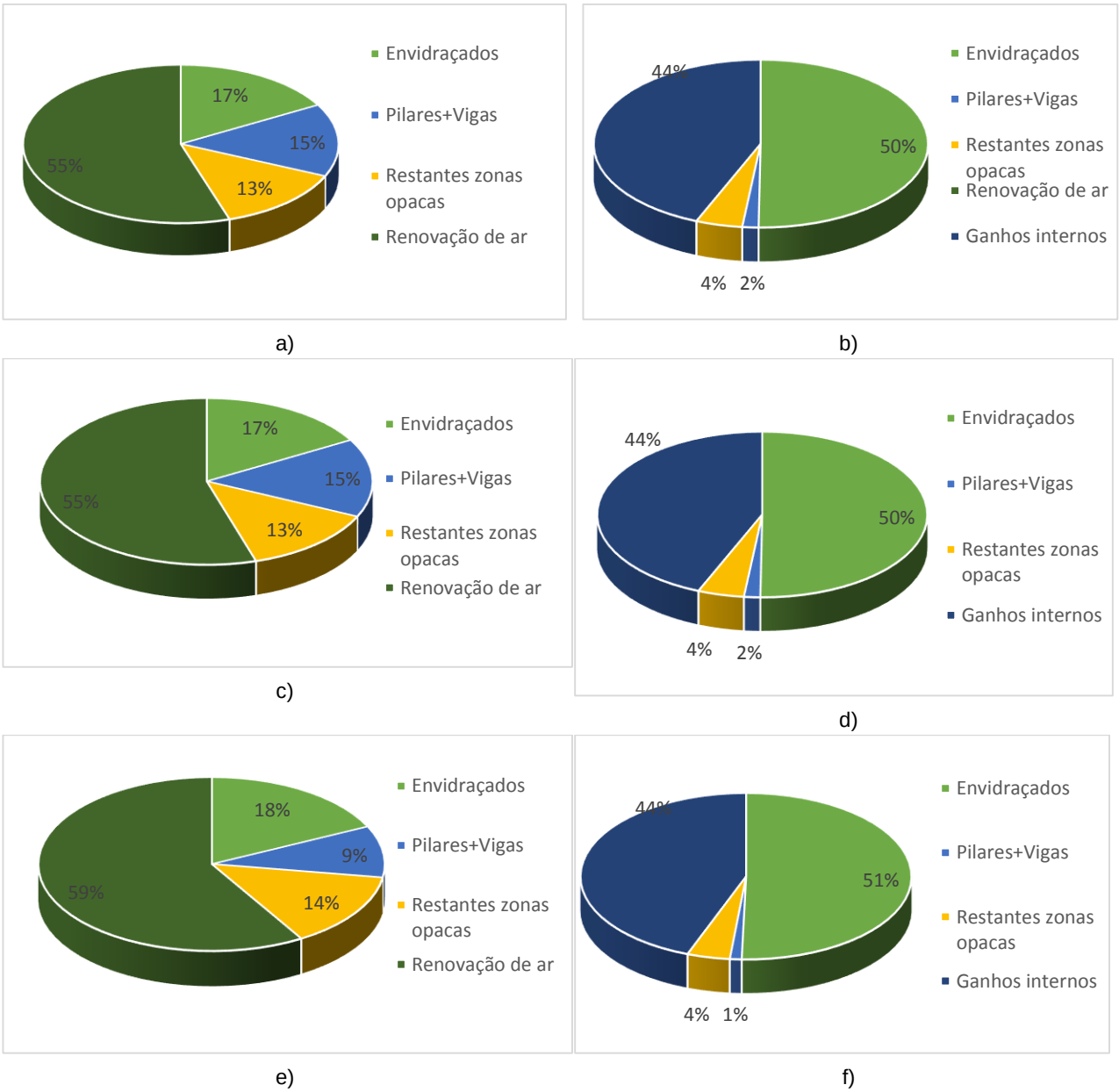


Figura 4.29 – Trocas de calor na estação de aquecimento de Hong Kong a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

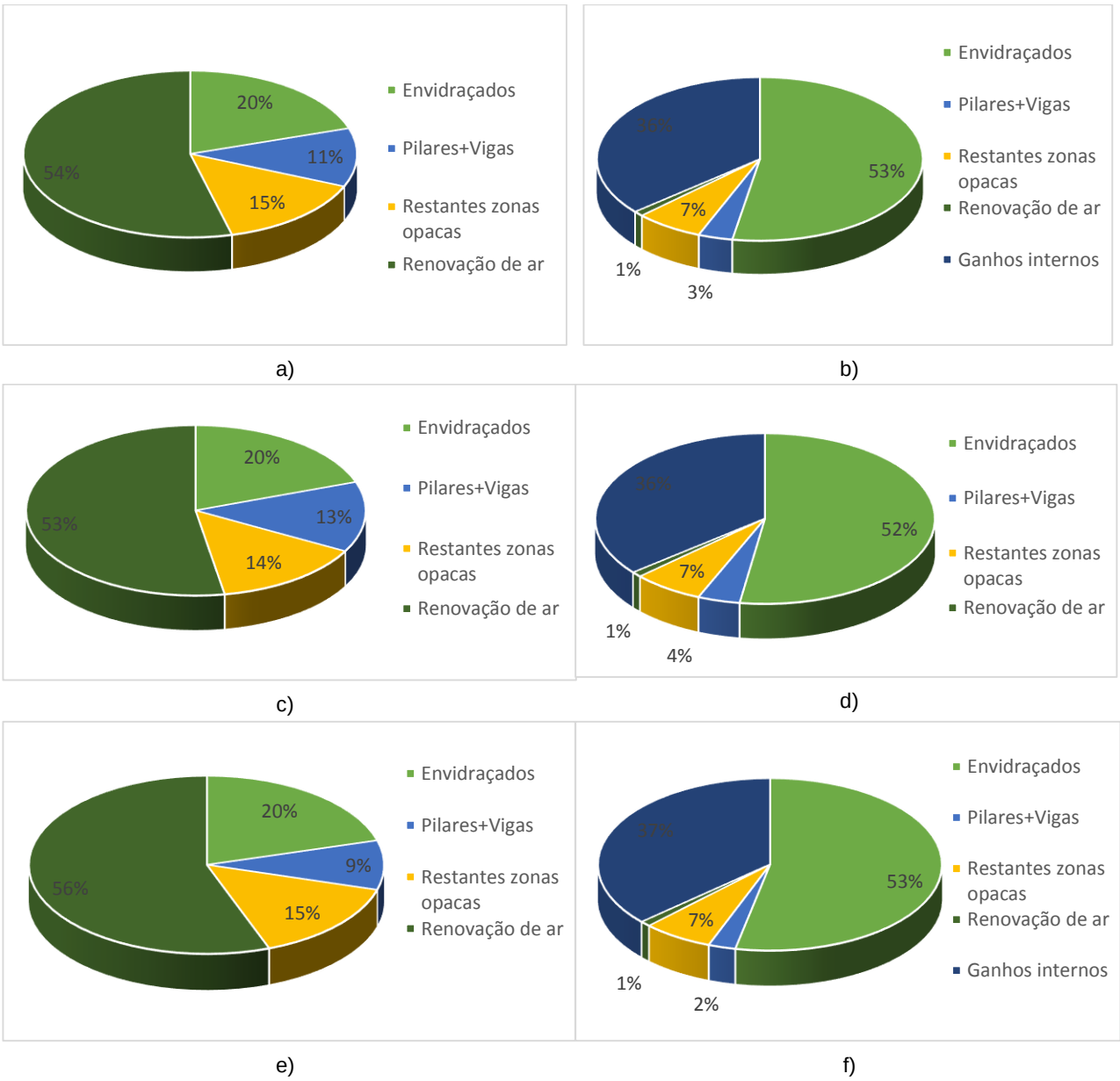


Figura 4.30 – Trocas de calor na estação de aquecimento de São Paulo a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

Analisando as Figuras 4.29 e 4.30, constata-se que, Hong Kong e São Paulo, também apresentam um peso percentual de perda de calor através da renovação de ar superior a 50%. Em relação às perdas de calor através dos vãos envidraçados, verificou-se um acréscimo em termos percentuais em São Paulo e Hong Kong, comparativamente com Lisboa para o mesmo tipo de betão.

Pela análise de comparação entre os betões normais e leves de composição semelhante, todas as localidades apresentam uma redução da perda de calor da envolvente opaca quase exclusivamente através dos elementos estruturais da envolvente (pilares e vigas) ao utilizar o betão leve. As localidades de Hong Kong e São Paulo apresentam uma redução de 3% e 16% no valor da perda de calor através dos elementos estruturais, que representam uma poupança de cerca de 10 kWh e 62 kWh ao utilizar o betão leve, respectivamente.

A cidade de São Paulo é a única localidade que apresenta um ganho de calor residual de cerca de 1% através da renovação de ar (Figura 4.30 b), d), f)), devido o seu Inverno ser menos rigoroso, comparativamente com as restantes localidades. De acordo com o Instituto Nacional de Metereologia do Brasil, o mês mais frio, julho, apresenta uma temperatura média de 16,1°C, devido ao efeito de ilha de calor, causado pela alta densidade urbana e escassas áreas verdes, provocando dias quentes e secos durante o Inverno. As cidades de Hong Kong e São Paulo, apresentam ganhos de calor através da envolvente opaca, tanto na parcela dos elementos estruturais com nas restantes zonas opacas.

Ao comparar os resultados das perdas de calor dos betões leves com os de betões normais de composição semelhante, verifica-se uma redução de perda de calor mais significativa, como esperado, através dos elementos estruturais da envolvente exterior.

Na Figura 4.31, apresenta-se o peso percentual na estação de arrefecimento, das diferentes parcelas das perdas e ganhos de calor na estação de Verão, para a localidade de Lisboa.

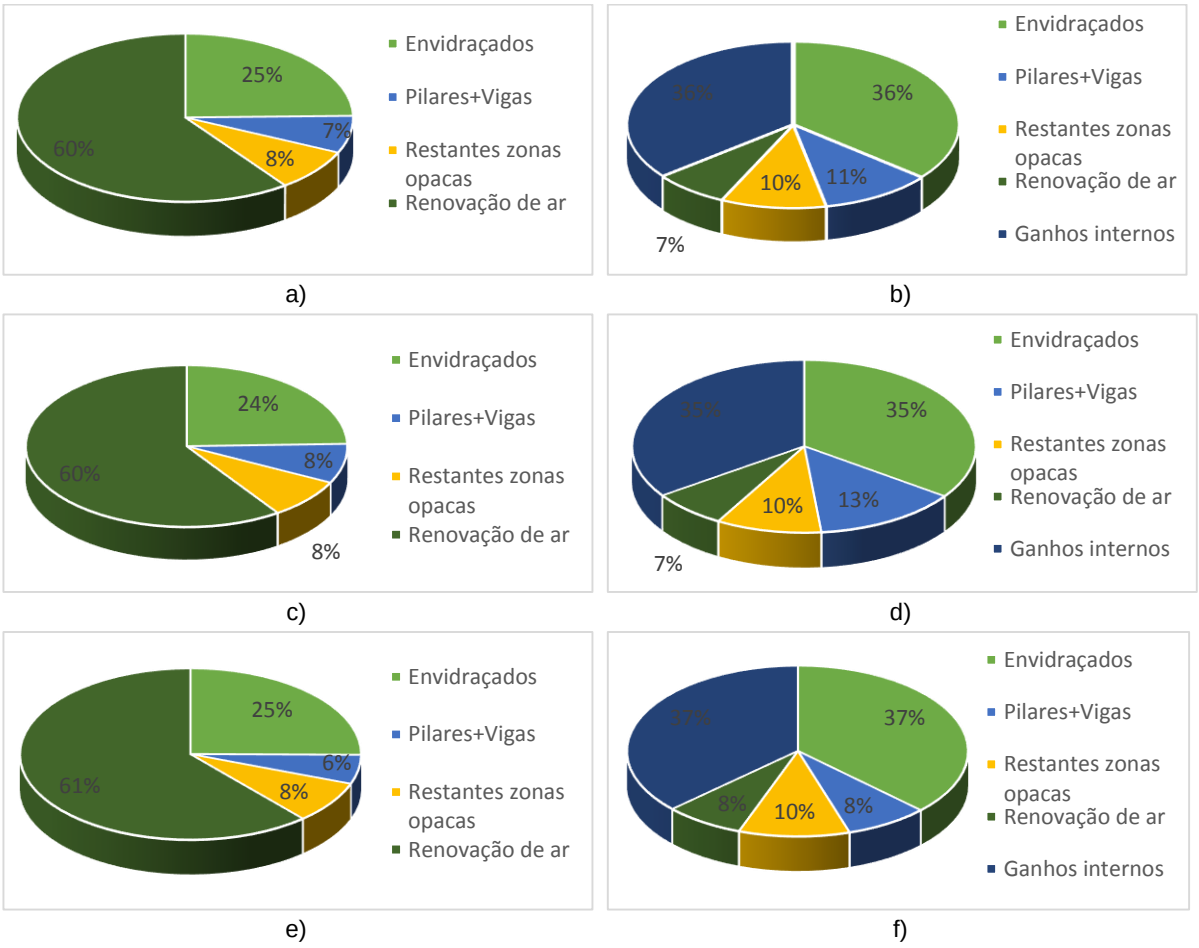


Figura 4.31 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Lisboa a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

Na estação de arrefecimento, Lisboa (Figura 4.31 a), c) e e)) apresenta um acréscimo nas perdas de calor através dos envidraçados em termos percentuais, comparativamente à estação de Inverno, ao contrário das perdas através dos elementos estruturais da envolvente, em que se verifica uma redução quer em termos absolutos como percentuais.

Verifica-se que também para a estação de arrefecimento, tanto a renovação de ar como as perdas pelos vãos envidraçados continuam a ser um peso relevante nas perdas totais de calor para os diferentes tipos de betão. As perdas de calor pela renovação de ar é o peso mais relevante nas perdas totais de calor, superior a 50%.

O betão leve BL 1 apresenta uma redução no valor da perda de calor através dos elementos estruturais da envolvente exterior de cerca de 10%, o que representa uma poupança superior a 15 kWh em relação ao betão normal de composição semelhante.

Ao comparar os betões leves com os betões normais de composição semelhante, verifica-se que a redução da perda de calor da envolvente opaca da fracção autónoma é exclusivamente através dos elementos estruturais (pilares e vigas).

O betão leve BL 4 comparativamente aos outros betões BN 1 e BL 1, apresenta uma redução de perda de calor da envolvente através dos elementos estruturais, de 47 kWh e 32 kWh respectivamente.

Nos ganhos de calor na estação de arrefecimento (Figura 4.31 b), d) e f)), observa-se uma contribuição significativa dos ganhos internos e pelos vãos envidraçados, em todos os tipos de betão. Comparativamente à estação de Inverno, verifica-se uma redução significativa nos ganhos através dos vãos envidraçados e uma maior contribuição dos ganhos através da envolvente opaca e da renovação de ar.

Ao comparar os resultados dos ganhos de calor dos betões normais com os de betões e leves de composição semelhante, verifica-se que os ganhos de calor que se altera mais significativamente é através dos elementos estruturais da envolvente exterior ao utilizar o betão leve.

O betão leve BL 1 apresenta-se uma redução no valor dos ganhos de calor através dos elementos estruturais da envolvente exterior cerca de 22%, o que representa uma poupança de cerca de 112 kWh em relação ao betão normal de composição semelhante. O betão leve BL 4 comparativamente aos outros betões BN 1 e BL 1, apresenta uma redução percentual dos ganhos de calor da envolvente através dos elementos estruturais, com redução de 227 kWh e 116 kWh respectivamente.

Nas Figuras 4.32 e 4.33, apresenta-se o peso percentual na estação de arrefecimento, das diferentes parcelas das perdas e ganhos de calor na estação de Verão, para as cidades europeias, Copenhaga e Londres.

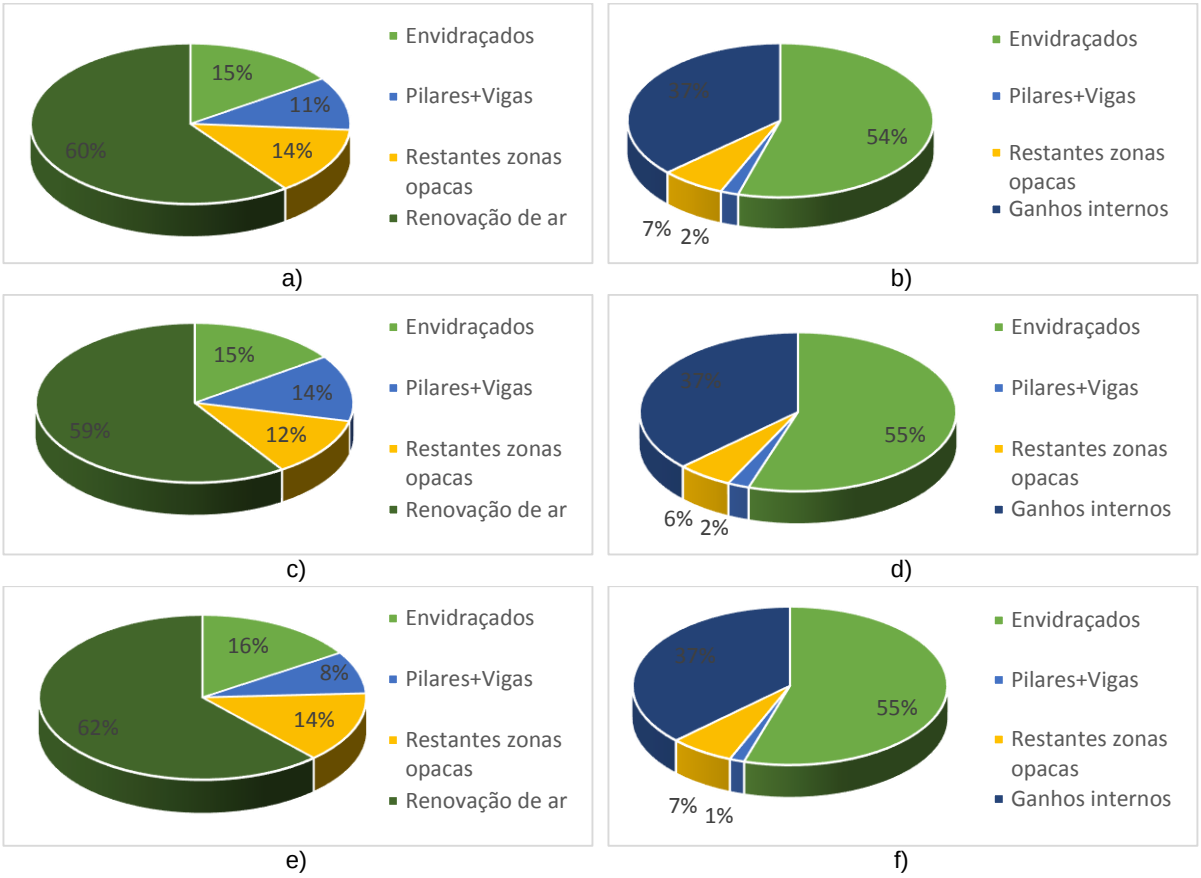


Figura 4.32 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Copenhaga a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

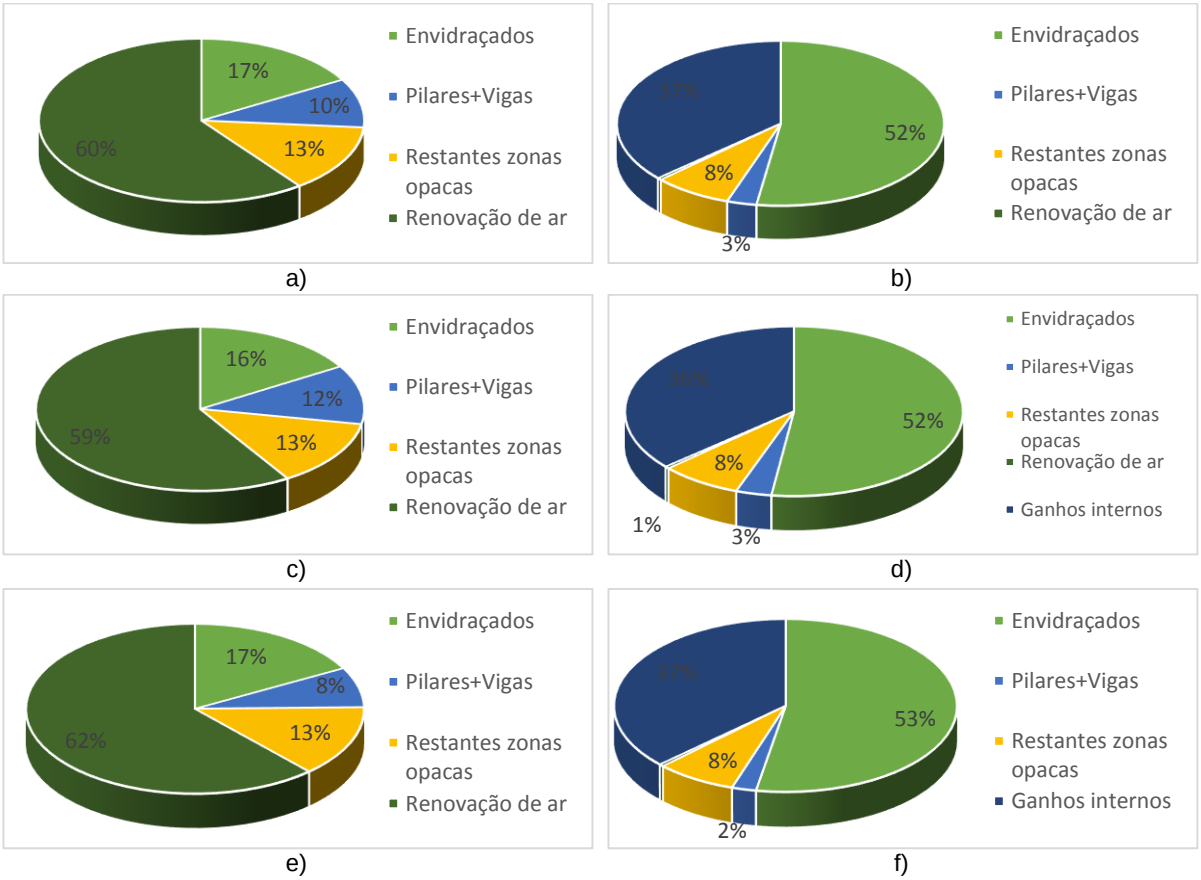


Figura 4.33 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Londres a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

Analisando as Figuras 4.32 a 4.33, verifica-se que também para a estação de arrefecimento, tanto a renovação de ar como as perdas pelos vãos envidraçados continuam a ser um peso relevante nas perdas totais de calor para os diferentes tipos de betão. A renovação de ar apresenta um peso percentual de perda de calor superior a 50%.

Comparando-se os betões normais com os betões leves de composição semelhante, as cidades europeias de Copenhaga e Londres, apresentam uma redução no valor da perda de calor através dos elementos estruturais da envolvente de cerca de 20% e 18%, que representa uma poupança de 87 kWh e 65 kWh ao utilizar o betão leve, respectivamente.

Ao comparar os resultados dos ganhos de calor do betão normal com os de betão leve de composição semelhante, as cidades europeias, de Copenhaga e Londres, apresentam uma redução dos ganhos de calor através dos elementos estruturais de cerca de 12% e 15%, o que representa uma poupança de cerca de 9 e 18 kWh, respectivamente, ao utilizar o betão leve.

Nas Figuras 4.34 e 4.35 apresentam-se o peso percentual na estação de arrefecimento, das diferentes parcelas de perdas e ganhos de calor na estação de Verão, para as localidades de Hong Kong e São Paulo.

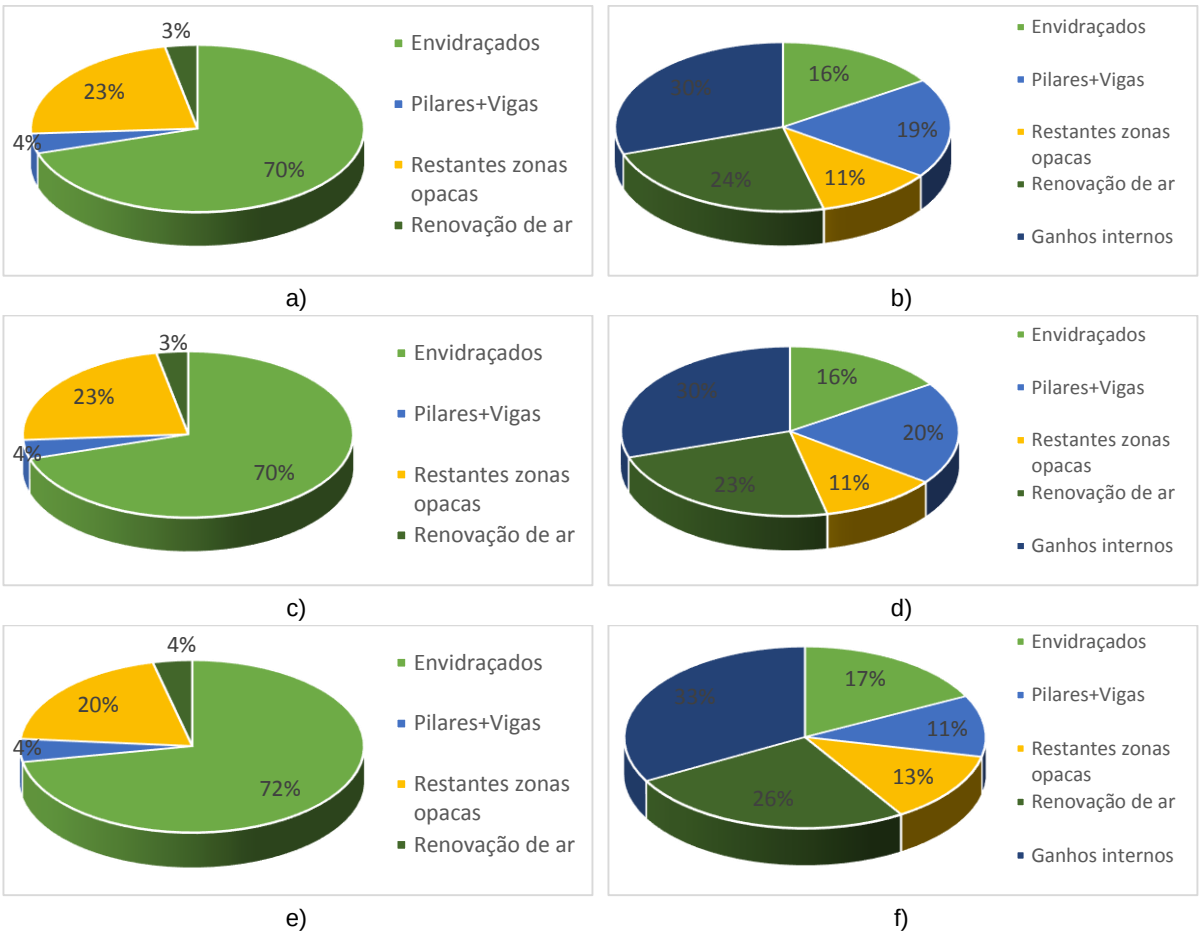


Figura 4.34 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de Hong Kong a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

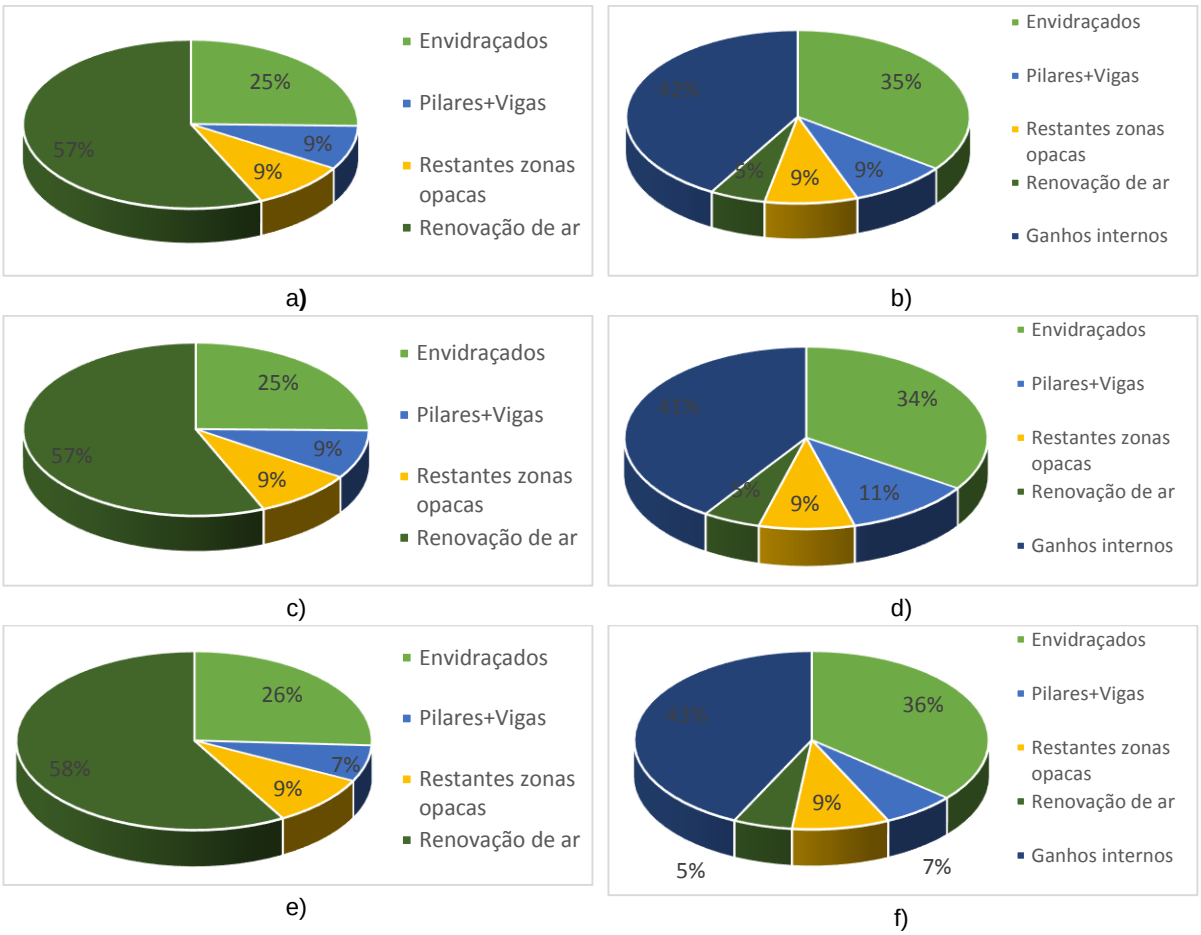


Figura 4.35 – Trocas de calor na estação de arrefecimento de São Paulo a) Perdas de calor do betão BL 1; b) Ganhos de calor do betão BL 1; c) Perdas de calor do betão BN 1; d) Ganhos de calor do betão BN 1; e) Perdas de calor do betão BL 4; f) Ganhos de calor do betão BL 4.

Analisando a Figuras 4.34, em Hong Kong, as perdas de calor pelos vãos envidraçados é o peso mais relevante nas perdas totais de calor para os diferentes tipos de betão, superior a 70%.

A cidade de Hong Kong, na estação de Verão, representa em média cerca de 0,6% das perdas totais de calor nessa estação na cidade de Lisboa. Ao comparar os betões leves com os betões normais de composição semelhante, constata-se uma ligeira redução de 0,04 kWh de perda de calor através da envolvente opaca. De facto, a temperatura média de Verão de Hong Kong é de cerca de 28 ˚C, próxima da temperatura de conforto, que conduz uma reduzida perda de calor através da envolvente opaca.

Na análise de comparação entre os betões normais e leves de composição semelhante, a localidade de São Paulo apresentam uma redução de 8% no valor da perda de calor através dos elementos estruturais, que representa uma poupança de cerca de 9 kWh ao utilizar o betão leve.

Em relação aos ganhos na estação de arrefecimento, a cidade Hong Kong apresenta uma melhor distribuição dos ganhos de calor nas suas parcelas e a localidade de São Paulo apresenta um comportamento semelhante a Lisboa, observa-se uma contribuição significativa dos ganhos internos e pelos vãos envidraçados, em todos os tipos de betão.

Ao comparar os resultados dos ganhos de calor do betão normal com os de betão leve de composição semelhante, verifica-se que os ganhos de calor que se alteram mais significativamente são através dos

elementos estruturais da envolvente exterior. Hong Kong, apresenta uma redução de 4 %, o que representa uma poupança de cerca de 30 kWh e São Paulo apresenta uma redução no valor dos ganhos de calor através dos elementos estruturais da envolvente exterior de cerca de 21%, o que representa uma poupança de cerca de 72 kWh, na utilização de betão leve em relação ao betão normal de composição semelhante.

Em geral, constata-se na estação de Verão, um incremento do peso relativamente aos ganhos através da envolvente opaca e dos ganhos originados pela renovação de ar, comparativamente à situação de Inverno, facto que se deve à maior intensidade da radiação solar e à maior temperatura do ar exterior.

Todas as localidades apresentam o mesmo tipo de comportamento no que respeita à utilização de betão leve BL 4 relativamente aos outros tipos de betão. O betão leve BL 4 comparativamente com os outros betões BN 1 e BL 1, apresenta uma redução da perda de calor da envolvente através dos elementos estruturais.

4.4.3. Coeficientes de transmissão térmica dos elementos estruturais e espessuras mínimas de isolamento térmico

No Quadro 4.2 apresentam-se os valores de coeficiente de transmissão térmica (ver equação 2.11 no Capítulo 2) dos elementos estruturais (pilares e vigas) que constituem zonas de ponte térmica plana da envolvente opaca vertical exterior. Segundo o REH (2013), o coeficiente de transmissão térmica das zonas de ponte térmica plana (zonas não correntes) tem de ser limitado ao valor máximo regulamentar (que depende da zona climática do local) e ao dobro do coeficiente de transmissão térmica da zona corrente, que neste caso é a alvenaria de tijolo. Esta verificação pode ser dispensada sempre que o coeficiente de transmissão térmica da zona de ponte térmica plana seja inferior ou igual a 0.9W/m^{2}ºC, o que não é o caso. O cumprimento deste requisito de qualidade térmica dos elementos estruturais conduz à necessidade de se utilizar camadas de material de isolamento térmico, como correcção térmica, e assim limitar as perdas de calor por estas zonas de heterogeneidade.

No Quadro 4.2 apresenta-se também a espessura mínima de uma camada de isolamento térmico em poliestireno extrudido a aplicar nos elementos estruturais em Portugal constituídos pelos diferentes betões ensaiados e utilizados no presente estudo.

Quadro 4.2 - Coeficientes de transmissão térmica dos elementos estruturais e espessura mínima de isolamento térmico

	λ (W/m°C)	$U_{pilares\ e\ vigas}$ (W/m^{2}ºC)	$U_{corrente}$ (W/m^{2}ºC)	$2U_{corrente}$ (W/m^{2}ºC)	$U_{máx}$ (I_1) (W/m^{2}ºC)	$U_{máx}$ (I_2) (W/m^{2}ºC)	$U_{máx}$ (I_3) (W/m^{2}ºC)	mín($2U_{corrente}$; $U_{máx}$) (W/m^{2}ºC)	$esp_{mín\ isol.}$ (m)
BN1	1,97	3,36	0,67	1,34	1,75	1,6	1,45	1,34	0,017
BN2	2,16	3,46							0,017
BN3	2,20	3,48							0,017
BL1	0,99	2,51							0,013
BL2	1,19	2,75							0,014
BL3	1,34	2,90							0,015
BL4	0,54	1,77							0,007

Verificou-se que, como esperado, a utilização de betões leves reduz a espessura necessária de isolamento térmico nos elementos estruturais. A redução da espessura de isolamento variou entre 13% e 22%, para os betões com composição semelhante. Esta redução de espessura de isolamento aumenta à medida que a relação a/c aumenta. No caso do BL4 (com areia leve), a redução da espessura mínima de isolamento térmico foi de 60%.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação em reduzir os consumos de energia no sector da construção é uma realidade actual. Nos edifícios pretende-se um ambiente interior termicamente confortável para os seus ocupantes sem grandes dispêndios de energia. Para melhorar o comportamento térmico e a eficiência energética dos edifícios deve adoptar-se estratégias de conceção e construção, tendo em conta aspetos construtivos, a interação com o clima local, a escolha dos materiais e a aplicação da legislação específica em vigor. Neste contexto, é necessário encontrar soluções alternativas com melhores propriedades térmicas donde se destaca o betão leve estrutural que permite obter soluções mais leves e energeticamente mais eficientes. Torna-se assim fundamental analisar o desempenho térmico de betões leves cujas características físicase mecânicas respondam às exigências estruturais dos edifícios.

O presente trabalho incidiu, numa primeira fase, na caracterização física,mecânica e térmica de betões produzidos com agregados leves de argila expandida Nacionais, tendo em consideração misturas correntes (a/c=,45 e a/c=0,60) e de elevado desempenho (a/c=0,35). Para tal, foi prevista uma campanha experimental que envolveu a realização de ensaios de compressão, tração, módulo de elasticidade e determinação do coeficiente de condutibilidade térmica. Tendo em consideração betões com agregados grossos ou agregados grossos e finos de argila expandida, para diferentes níveisde compacidade, foi possível abranger betões de diferentes classes de resistência, representativos dos betões correntemente utilizados em edifícios. Paralelamente a este trabalho, foram igualmente ensaiados betões de massa volúmica normal de igual composição de modo a avaliar o comportamento relativo das várias soluções preconizadas.

Com base nos resultados experimentais obtidos durante a primeira parte do trabalho, foi realizada, numa segunda fase, um conjunto de simulações energéticas em *EnergyPlus* que permitiu analisar o desempenho térmico de uma fracção autónoma de um edifício localizada em diferentes países com diferentes climas e com os elementos estruturais constituídos com diferentes tipos de betão (leves e normais)

Foi assim possível analisar, de forma abrangente, o desempenho térmico da envolvente de edifícios em betão leve, avaliando-se, quer as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, quer as diferentes componentes de trocas de calor, para assegurar as condições de conforto térmico dos seus ocupantes.

Desta forma, espera-se ter contribuído com a presente dissertação para o aprofundamento do conhecimento das propriedades dos betões levese do seu potencial de utilização em soluções estruturais, com vista à melhoria do desempenho térmico da envolvente de edifícios.

5.2. CONCLUSÕES GERAIS

No presente trabalho foi possível efectuar a caracterização mecânica e térmica de betões estruturais produzidos com agregados de massa volúmica normal, agregados grossos leves e agregados grossos e areias leves, tendo em consideração diferentes composições, nomeadamente relações a/c variáveis entre 0,35 e 0,6. Desse modo, foram analisados betões de massa volúmica normal de classes de resistência C 30/37 a C 55/67 e betões leves enquadrados nas classes de resistência LC 25/28 a LC 40/44 e de massa volúmica D 1,6 a D 1,8, o que demonstra a abrangência do trabalho.

Todos os betões foram produzidos com abaixamentos de 120±20 mm, independentemente do tipo de agregado e relação a/c, sem ter sido necessário proceder a correcções adicionais nas misturas. A massa volúmica seca dos betões com agregados leves variou entre cerca de 1630 e 1800 kg/m^3 em oposição aos valores superiores a 2250 kg/m^3 dos betões cavernosos, permitindo reduções médias no peso próprio dos elementos estruturais na ordem dos 25%. Por sua vez, a introdução de areias leves permitiu uma redução adicional de cerca de 20% na massa volúmica seca.

Porém, a diminuição benéfica da massa volúmica implicou a redução prejudicial da resistência mecânica, verificando-se perdas de até cerca de 35% na resistência à compressão. Esta diminuição da resistência dos BEAL face aos BAN, tende a aumentar com a redução da relação a/c, dado que o agregado assume maior influência para níveis de resistência superior. Apenas nos betões leves com relação a/c elevada (a/c=0,6) atingiram-se soluções mais eficientes do que nos BAN, o que significa a maior apetência destes betões para a produção de betões de baixa e moderada resistência. De facto, nos betões de elevado a/c, onde a compacidade da pasta assume um papel mais relevante na resistência do que o agregado, verifica-se que a eficiência estrutural tende a ser superior nos betões leves. A redução obtida na massa volúmica dos betões com areias leves não permitiu compensar a elevada perda de resistência nestes betões, na ordem dos 50%, o que conduziu a menores níveis de eficiência estrutural.

À semelhança do que sucede na resistência à compressão, os betões normais conduzem a maiores valores de resistência comparativamente aos betões leves de composição semelhante. Como seria de esperar, os betões com agregados mais fracos, são os que apresentam menor capacidade resistente à tracção, atingindo-se relações superiores a 35% face aos BAN. Tal como observado na resistência à compressão, a introdução de areia leve tende a prejudicar de forma importante as características mecânicas dos betões. Uma das principais desvantagens na utilização de betões leves em elementos estruturais está relacionada com a elevada redução ao nível da rigidez. No presente trabalho, confirmam-se reduções de cerca de 50% no módulo de elasticidade dos BEAL face aos BAN de igual composição.

A substituição de agregados normais por agregados grossos leves permitiu atingir soluções com reduções entre 40 e 50% no coeficiente de condutibilidade térmica.

Os betões leves estruturais produzidos com maior relação a/c, e logo com menor massa volúmica, conduzem às maiores reduções de condutibilidade térmica face aos betões convencionais de igual composição.

Do presente trabalho conclui-se que os betões leves estruturais produzidos com maior relação a/c, para além de poderem conduzir a maiores valores de eficiência estrutural, evidenciam os níveis mais elevados de isolamento térmico. Tendo em conta soluções correntes em equilíbrio com a humidade relativa ambiente, a redução de condutibilidade térmica nos betões leves foi em média cerca de 50%.

A introdução de areia leve nos BEAL permite atingir níveis de condutibilidade térmica de apenas cerca de 25% face aos BAN, o que se traduz num incremento importante da resistência térmica das soluções estruturais com este tipo de betão.

Em face dos resultados obtidos e da sua reduzida eficiência estrutural, os betões com areias leves apenas se justificam em soluções onde as exigências de massa volúmica e/ou isolamento térmico são determinantes e a resistência é menos relevante.

Conforme seria de esperar, verifica-se ainda uma redução natural do coeficiente de condutibilidade térmica,λ com o aumento do teor de humidade dos betões, constatando-se variações médias de cerca de 4 a 5% noλpor cada grau de humidade.

Finalmente, os valores obtidos para a condutibilidade térmica corroboram em geral os resultados obtidos por outros autores, seguindo o mesmo tipo de evolução exponencial em função da massa volúmica. Ainda assim, verifica-se que o método de caracterização experimental da condutividade térmica utilizado no presente trabalho tende a conduzir a valores ligeiramente superiores para uma dada massa volúmica, admitindo-se que os resultados obtidos sejam uma medida conservativa da real capacidade de isolamento destes betões.

Das simulações energéticas em *EnergyPlus* realizadas numa fracção autónoma de um edifício com as soluções estruturais de pilares e vigas constituídas com os diferentes tipos de betão ensaiados experimentalmente verificou-se que na estação de aquecimento, a substituição do betão normal por betão leve nos elementos estruturais, mostrou ser favorável em todas as localidades.As necessidades energéticas de aquecimento (Inverno) apresentam menores necessidades energéticas nos betões leves em relação aos betões normais de composição semelhante. As maiores poupanças energéticas com a utilização do betão leve, foram verificadas na localidade de Copenhaga por ter um Inverno mais rigoroso comparativamente com as restantes localidades.

Na estação de arrefecimento, observaram-se, em geral, menores necessidades energéticas nos betões leves em relação aos betões normais de composição semelhante, com excepção de Copenhaga e Londres. Este facto pode ser explicado pelas menores temperaturas médias diárias exteriores nestas duas localidades face às restantes localidades, existindo, em média, mais perdas de calor pelos elementos da envolvente durante o Verão. Ao se colocar um betão leve, com características mais isolantes, estar-se-ão a limitar essas perdas de calor e, desde modo, a aumentar as necessidades energéticas de arrefecimento em comparação com os casos com betão normal. Refira-se, no entanto, que a nível anual, analisando a estação de aquecimento e arrefecimento em conjunto, mesmo nos casos de Copenhaga e Londres, verifica-se que o betão leve conduz a um melhor desempenho térmico do que os betões normais.

Como esperado, as necessidades energéticas, quer de aquecimento quer de arrefecimento, e as respetivas poupanças energéticas introduzidas com a utilização do betão leve, variam de localidade para localidade consoante o clima.

Relativamente à análise das parcelas de perdas de calor verifica-se que, de um modo geral, em ambas as estações de aquecimento e arrefecimento, as parcelas de perdas de calor com maior peso na distribuição das perdas totais, são as correspondentes à renovação de ar e às perdas pelos vãos envidraçados. Ao comparar os betões leves com os betões normais de composição semelhante, verificou-se que em todas as localidades, tal como esperado, a redução de perda de calor da envolvente opaca dá-se quase exclusivamente através dos elementos estruturais.

Na estação de aquecimento, as localidades com condições climáticas de Inverno mais severas, nomeadamente Copenhaga e Londres, não apresentaram ganhos de calor através da envolvente opaca, ao contrário das outras localidades com Inverno mais temperado. Na estação de Verão, os ganhos pelos vãos envidraçados apresentam uma contribuição significativa na distribuição total dos ganhos térmicos do edifício, devido à transmissão directa da radiação solar para o interior.

Em geral, constata-se na estação de Verão um incremento do peso relativamente aos ganhos através da envolvente opaca e dos ganhos originados pela renovação de ar, comparativamente à situação de Inverno, facto que se deve à maior intensidade da radiação solar e à maior temperatura do ar exterior na estação de Verão.

Como se constatou nesta dissertação, em geral, os betões leves utilizados em elementos estruturais na envolvente de um edifício, apresentam um melhor desempenho térmico e energético do que os betões normais. Os betões leves estruturais permitem soluções construtivas com melhor comportamento térmico, no sentido que minimizam as trocas de calor e reduzem as necessidades energéticas necessárias para garantir o conforto térmico pretendido.

Dependendo das condições climáticas, da localização dos edifícios e da composição do betão (relação a/c das misturas), a substituição de agregados leves conduziram a reduções de 0,7 a 4,4% nas necessidades energéticas de Verão e 3,7 a 19,4% nas necessidades energéticas de Inverno. A introdução de areias leves implicou os maiores níveis de eficiência energética, conduzindo a uma redução das necessidades energéticas de até 6,4% no Verão e 40,0% no inverno.

Verificou-se também que a utilização de betões leves reduz a espessura mínima de isolamento térmico nos elementos estruturais para cumprir os requisitos mínimos de qualidade térmica da envolvente opaca exterior. Para Portugal, a redução da espessura mínima de isolamento térmico é entre 13 e 22% (para betões BL 3 e BL 1) e atingindo valores de redução de 60% da espessura para o betão BL 4.

Tendo em consideração betões de igual classe de resistência, os betões de agregados grossos leves com a/c entre 0,35 e 0,45 seriam comparáveis aos betões de massa volúmica normal com a/c de 0,6. Por sua vez, os BEAL com a/c de 0,6 seriam comparáveis aos BEAL de areia leves com a/c de 0,35. Nessas condições, a utilização de agregados leves torna-se ainda mais interessante do ponto de vista da eficiência energética, reforçando o maior nível de desempenho térmico dos BEAL face aos BAN.

Assim, é imprescindível a análise das condições climáticas do local e o estudo do comportamento térmico do edifício com soluções que proporcionem um melhor desempenho energético e que assim contribuam para o desenvolvimento da sustentabilidade ambiental.

5.3. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Com base no estudo realizado, foi possível aprofundar o conhecimento sobre o desempenho térmico de betões leves de diferentes classes de resistência. No entanto, existe a necessidade de realizar trabalhos adicionais nesta temática que permitam uma melhor confiança na utilização deste tipo de betões. Neste contexto, são mencionadas de seguida algumas propostas de desenvolvimento futuro que poderão ajudar a complementar o presente estudo e a aumentar o conhecimento na utilização destes betões:

- realização de uma análise global, em termos de conforto térmico, do custo-benefício da utilização de betão leve estrutural em soluções de fachada, tendo em consideração betões produzidos com diferentes composições e tipos de agregado;
- quantificação, para diferentes condições climáticas, das correcções necessárias a efectuar em zonas de elementos estruturais que atuam como pontes térmicas, confrontando os custos envolvidos em soluções com betão leve estrutural ou betão de massa normal de idêntica composição ou da mesma classe de resistência;
- definição de sistemas construtivos optimizados que aliem as melhores soluções encontradas para os betões leves em elementos estruturais com as melhores soluções para a utilizam de estes ou outros materiais em painéis de enchimento não estruturais;
- realização de protótipos a escala real que permitam fazer uma caracterização rigorosa do desempenho energético das melhores soluções estruturais e não estruturais em betão leve;
- realização de estudos comparativos que validem a utilização dos métodos expeditos de medição da condutibilidade térmica ao caso específico dos betões com agregados leves;
- estudo mais aprofundado do desempenho mecânico e de durabilidade de betões leves produzidos com diferentes composições, de modo a aliar a produção de betões energicamente eficientes com betões de suficiente durabilidade e adequado desempenho estrutural.;
- avaliação do desempenho acústico de soluções de fachada com incorporação de betão leve;
- avaliação do comportamento térmico de betões leves em elementos não estruturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 213R. "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete." Amer. Concrete Institute, Jan 2003. 38p.

ACI 213R. "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete." Amer. Concrete Institute, Jan 2003. 38p.

Almeida, Ivan Ramalho. Betões de Alta Resistência e Durabilidade. Composição e Características. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1990.

Arlita (2001) – "Dossier Técnico, Homigón ligero estructural – ARLITA.

Arsenovic, Milica; Lalic, Zeljko; Radojevic, Zagorka, "Clay Brick Walls Thermal Properties", International Jounal of Modern Manufacturing Technologies Vol. II, Nº 1; Belgrade, Serbia, 2010.

Bogas JA, Gomes A. Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction. Materials & Design, Vol 46, 832–841, 2013.

Bogas, J. A., Tese de doutoramento Caracterização de Betões Estruturais com Agregados Leves de Argila Expandida, Volume I, Junho de 2011.

Canha da Piedade, A., Introdução à térmica dos edifícios: noção sobre transmissão de calor, Instituto Superior Técnico, 1980.

Canha da Piedade, A.; Moret Rodrigues, A.; Roriz, F., Luís, Climatização em edifícios, Envolvente e comportamento térmico, Abril 2003.

Canovas, Manuel Fernandez. Hormigon. Madrid, Espanha: Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos. Séptima edición, 2004.

Chen, H-J, T. Yen, e T-P Lai. "A new proportion method of light-weight aggregate concrete based on dividing strenght." Internat. Symp. on structural lightweight aggregate concrete, 20-24 June. Sandefjord, Norway: Editors: I. Holand et al, 1995. pp 463-471.

Chi, J.M., R. Huang, C.C. Yang, J.J. Chang "Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete." Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issue 2, February, 2003: pp 197-205.

Comité Euro-International du Béton, Internacional Federation for Prestressing, Lightweight Aggregate Concrete-Manual of Design and Techonology, New York, Longman Inc, 1977, 169 p. (CEB/FIB 1977)

Cruz, P., Jalali, S. e Magalhães, A. (2000) – "BETÕES LEVES – Estado do conhecimento e aplicações estruturais", Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Cruz e Magualhães; 2000).

Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable, Energy Plus Manual, US Department of Energy, USA, Abril de 2004.

Ernest Orlando EnergyPlus Input Output Reference (2013) – Lawrence Berkeley National Laboratory, US Department of Energy, EUA.

Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Input Output Reference, US Department of Energy, EUA, 2009.

EuroLightConR2. "LWAC Material Properties, State-of-the-Art." "European Union - Brite EuRam III, BE96-3942/R2, December, 1998. 111p.

Faust, T. "Proerties of diferent matrixes and LWACs and their influences on the behaviour of structural LWAC." Second International Sympsium on structural lighteight aggregate concrete, 18-22 June, Kristiansand, Norway: Editors: S. Helland et al, 2000. pp 502-511.

Faust, T. "The behaviour of structural LWAC in compression." Second Internacional Symposium on structural lightweight aggregate concrete, 18-22 June. Kristiansand, Norway: Editors: S. Helland et al, 2000b, pp 512-521.

FIB "FIB manual of Lightweight aggregate concrete." Fédération internationale de la précontrainte (FIB), second edition, Surrey University Press, France, 1983. 259p.

FIP (2000) – “Lightweight Aggregate Concrete”, Working Group on Lightweight Aggregate Concrete, Bulletin 8, FIB – Féderation internacionale du béton, Lausanne.

Freitas, Itamar M., Kátia A. Allende, e Fathi A. Darwish. "Effect of plastic regect and natural sand additions on the microstructure and mechanical behaviour of cellular concrete." Internat. Symposium Polymers in concrete. Guimarães, Portugal: pp 119-129, 2006.

Hammer, T.A. "The influence of lightweight aggregates properties on material properties of the concrete." International Sympsium on Structural lightweight aggregate Concrete, 20-24 June, Snaderfjord, Norway: Editors: I. Holand et al, 1994. pp 517-532.

Heimdal et al. (1999) – “Balconies in LWC”, SINTEF Re-150 página Wb.

Holm, T. A., Bremner, T. W. (1992) – “High Strenght Lightweight Concrete”, High Performance Concrete and Aplications, Ed. S. Ahmad and S. P. Shah.

Holm. T. A., “Lightweight Concrete and aggregates”, Test and Properties of Concrete, Cap.48, Standard Technical Publication 169 C, ASTM, 1994, p. 522-532.

Isolani, Peraldo, Eficiência energética nos edifícios residenciais, Manual do consumidor, Lisboa 2008.

ITE50. “Coficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios.” Laboratório de engenharia civil (LNEC), Carlos A. Pina dos Santos e Luís Matias. Versão actualizada, 2006. 40p, Portugal.

Jakobsen, S.E. "The use of LWAC in the Ponttons of the Nordhorland floating bridge." Second International Sympsium on structural lighteight aggregate concrete, 18-22 June, Kristiansand, Norway: Editors: S. Helland et al, 2000. pp 73-78.

John L, Clarke Strucutural Lightweight Aggregate Concrete, Editor: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, Wester Cleddens Road, Glasgow, First edition 1993.

Johnsen, H., S. Helland, e E. Heimdal. "COnstruction of the Stovset Free Cantilever Bridge and the Nordhordland cable stayed bridge." International Synpsosium on structural lightweight aggregate Concrete, 20-24 June. Sandefjord, Norway: Editors: I.Holand et al, 1995. pp 373-379.

Lanham, Ana; Gama, Pedro; Braz, Renato; Arquitectura Bioclimática: Perspectivas de inovação e futuro (Seminários de Inovação), IST, Lisboa, 14 de Junho de 2004.

Legislação Portuguesa. Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril - Regulamentação das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE, Diário da República I - Série B, Portugal, 2006.

Lourenço P.B. e Sousa, H. Seminário sobre Paredes de Alvenaria, Porto, Portugal, 2002.

Maage et al. (1998) - "Chloride penetration into concrete with LWA", EuroLightCon, Noruega (Maage, 1998).

Malhotra, V. M. (1987) – "CANMET Investigations in the Development of High Strength Lightweight Concrete", Symposium in Utilization of High Strenght Concrete, Stavanger, Norway.

Mehta, P. Kumar, e Paulo J.M. Monteiro. Concrete. Microestructure, properties and materials, third edition, Mc Graw Hil, 2006.

Melby, Ing. karl. "Use of high strength LWAC in NOrweigain bridges. "Second International Sympsium on structural lighteight aggregate concrete, 18-22 June, Kristiansand, Norway: Editors: S. Helland et al, 2000. pp 47-56.

Mimoso, João Manuel, Transmissão de calor: bases teóricas para aplicação à térmica de edifícios, LNEC, 1987, Portugal.

Mindess, Sidney, J. Francis YOung, and David Darwin. Concrete. Second edition. Edited by Prentice Hall, Pearson Education, Inc, 2003.

Mohd Roji Samidi,(1997). First report research project on lightweight concrete, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor Bahru.

Mourin, D., e A. Vaquier. "Etude des états-limites des bétons dárgile expanse en compression biaxiale et de leur évolution en function de la vitesse de montée en charge. "In Granulats et betons legers-Bilan de dix ans de recherches, de M.Arnould et M.Virlogeux M, pp 349-358 Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1986, France.

Murillo, J. A., Thoman, S., Smith, D. (1994) – "Lightweight Concrete for a Segmental Bridge", American Society of Civil Engeneers.

Neville, A.M. Properties of Concrete. Fourth edition, Longman, 1995.

Neville, Adam M. "Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete." ACI materials Journal, nº94-M9; pp 71-74.

Newman, J.B. "Properties of structural lightweight aggregate concrete." In Structural Lightweight Aggregate Concrete, by J.L. Clarke, pp 19-44. Chapman & Hall, 1993.

NPEN2006-1. "Betão. Part 1 - Especificação, performance, produção e cnformidade." European Committee for standardization, CEN/TC 104-Concrete. Versão portuguesa da EN 206-1:2000+ A1:2004, Instituto português da Qualidade, Junho de 2005. 84p.

Nussenzveig, H. M. – "Física Básica" – 2ª ed. - vol. 2 - seção 7.1 – Ed. Edgard Blücher Ltda – 1981, Portugal.

Osman ünal, Tayfun Uyguniglu, Ahmet Yildiz, "Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal inSulation.", Building and Enviromnment 42 pp. 584-590, Received 21 de July 2005, accepted Setembro 2005.

Pankhurst, R.N.W. "Construction." In Structural Lightweight Aggregate Concrete, de J.L. Clarke, pp 75-105. Chapman & Hall, 1993.

Pereira, Fábyo, Luiz, Determinação computacional de parâmetros físicos no comportamento termoenergético de uma edificação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Junho 2005,Porto Alegre.

Punkkin, J., e Gjorv, O.E., "Water Absorption by High Strength Lightweight Aggregate", Utilisation of High Strength Concrete Symposium, Lillehammer, Norway, 1993, p. 713-721; 110.

Ramalheira, F. Manual de boas práticas de escolha de vãos envidraçados, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2005.

Roberts, James E. "Lightweight Concrete for California's Highway Bridges." Engineered concrete structures vol.10, nº 3, Portland cement association. Expanded Shale, Clay and Slate Institute publication #4700.11, USA, 1997, 4p.

Silva, Pedro Correia Pereira da, Análise do Comportamento Térmico de Construções não convencionais através de Simulação em VisualDOE, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2006, Portugal.

ACI 213R. "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete." Amer. Concrete Institute, Jan 2003. 38p.

Silva, Pedro Correia Pereira da, Análise do Comportamento Térmico não convencionais através de Simulação em VisualDOE, Universidade do Minho, Escola de Engenharia.

SPRATT, B., H., "An introducion to lightweight concrete", Cement and Concrete Association, 6ª Ed., 1980, 15p.].

State of the Art Report on High-Strenght, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Enviroments - Thomas A. Holm and Theodore W. Bremner – August 2000.

Tikalsky, P.J., J Pospisil, e W.A. Mac Donald. "A method ofr assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete". Cem. Concrete Research, 34, 2004; pp 889-893.

Viera, M. G. (2000) – “Betões de elevado desempenho com agregados leves – Durabilidade e microestrutura” – Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

Virlogeux, M. "Généralités sur les caractères des bétons légers." In Granulats et betons legers-Bilan de dix ans de recherches, by M. Arnould et M. Virlogeux, pp 111-246. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1986, France.

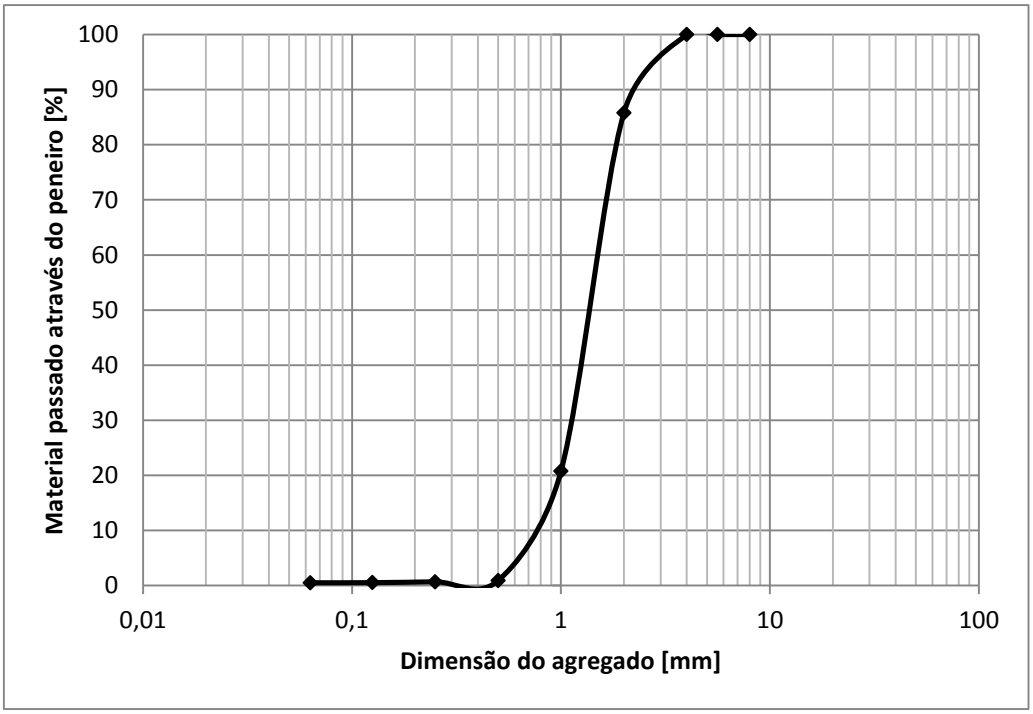
Zhang, M. H. And GjØrv, O. E., “Characteristics of lightweight Aggregate for High Strength Concrete”, ACI Material Journal, Mar/Apr. 1991, Berkeley p. 150-158.

Zhang, N. H., and GjØrv, O. E., “Development of High Strength Lightweight Concrete”, High Strength Concrete – Second International Sympsium, Berkeley, 1990, p. 667-681.

ANEXO A – ANALÍSE GRANULOMÉTRICA

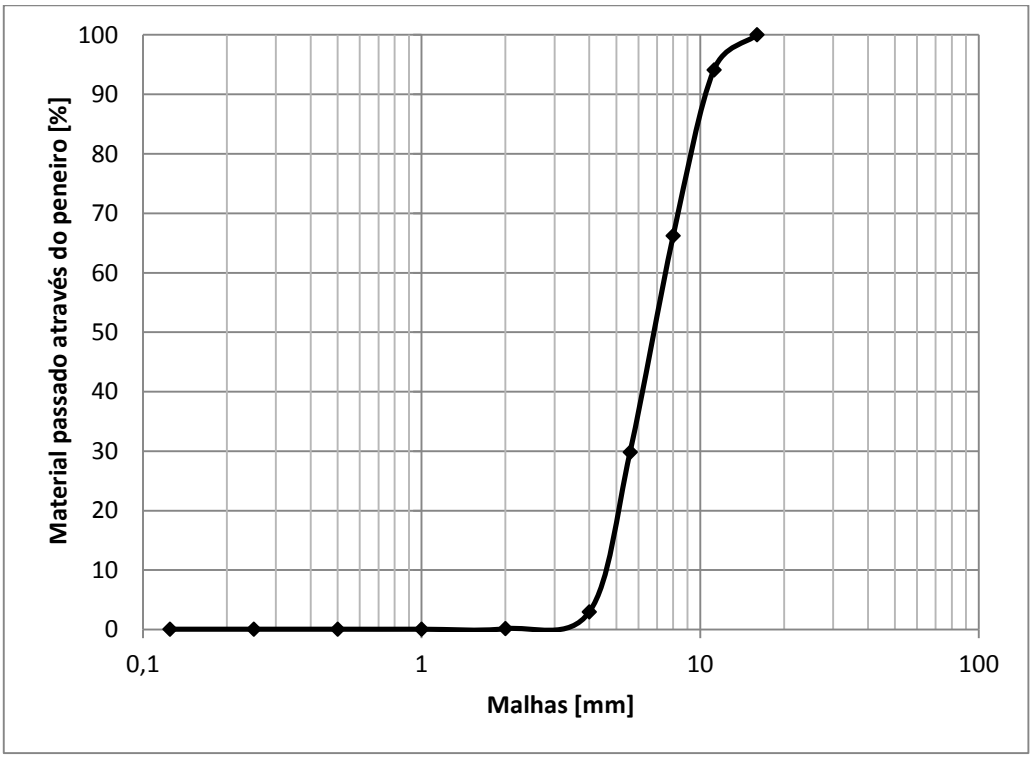
Areia Leve

Material: **AREIA LEVE**				
Massa da amostra [g]				**1028,4**
Peneiro (mm)	**Resíduo (Retido)**		**Resíduo acumulado**	
			Passado	**Retido**
	[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
8,0	0,0	0,00	100,00	0,00
5,6	0,0	0,00	100,00	0,00
4,0	0,1	0,01	99,99	0,01
2,0	146,3	14,30	85,69	14,31
1,0	668,8	65,36	20,34	79,66
0,5	204,1	19,95	0,39	99,61
0,250	2,1	0,21	0,19	99,81
0,125	1,6	0,16	0,03	99,97
0,063	0,2	0,02	0,01	99,99
Refugos	0,1	0,01		
Totais	1023,3	100,00		
Módulo de Finura				3,93
Variação da massa [%]				0,50



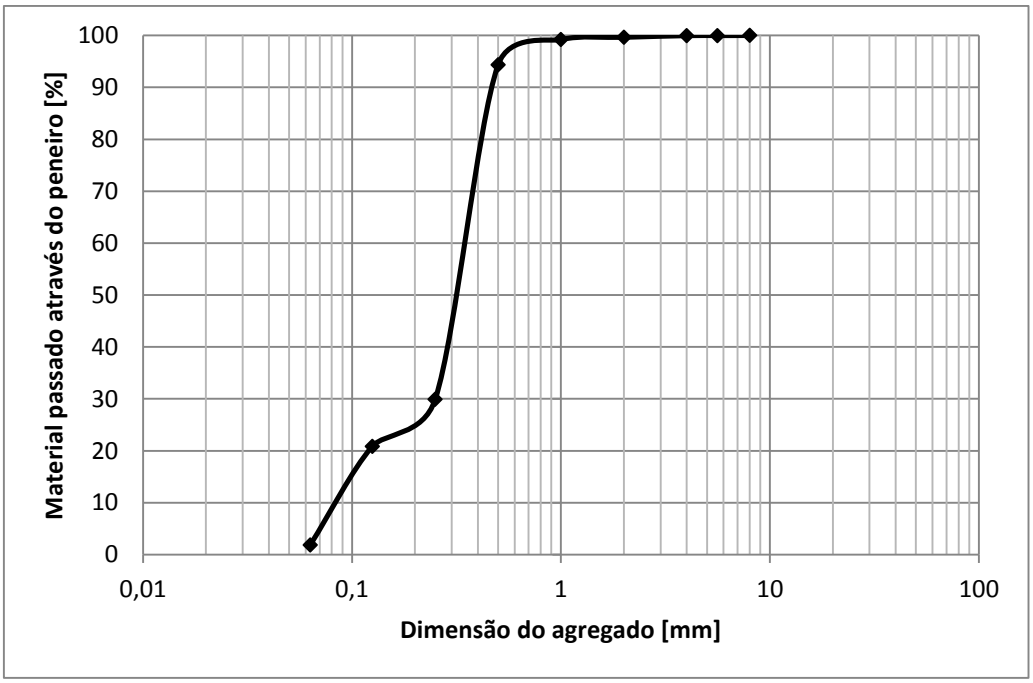
Leca

Material: **LECA**				
Massa da amostra [g]				**1005,4**
Peneiro (mm)	**Resíduo (Retido)**		**Resíduo acumulado**	
			Passado	**Retido**
	[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
16,0	0	0	100,00	0
11,2	58,9	5,88	94,12	5,88
8,0	279,8	27,91	66,21	33,79
5,6	364,7	36,38	29,83	70,17
4,0	269,1	26,85	2,98	97,02
2,0	28,4	2,83	0,15	99,85
1,0	0,8	0,08	0,07	99,93
0,5	0	0,00	0,07	99,93
0,250	0	0,00	0,07	99,93
0,125	0	0,00	0,07	99,93
0,063	0	0,00		
Refugos	0,7	0,07		
Totais	1002,4	100,00		
Módulo de finura				6,30
Variação da massa [%]				0,30



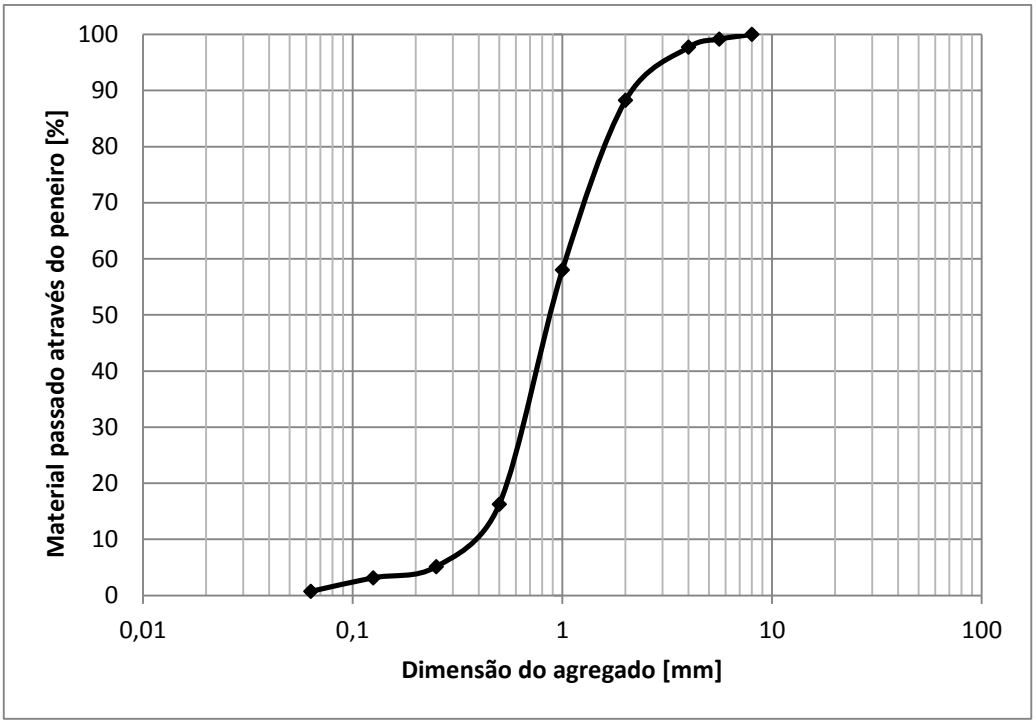
Areia fina

Material: **AREIA FINA**				
Massa da amostra [g]				**1003,0**
Peneiro (mm)	**Resíduo (Retido)**		**Resíduo acumulado**	
			Passado	**Retido**
	[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
8,0	0,0	0,00	100,00	0,00
5,6	0,2	0,02	99,98	0,02
4,0	0,1	0,01	99,97	0,03
2,0	3,3	0,33	99,64	0,36
1,0	4,4	0,44	99,20	0,80
0,5	49,1	4,94	94,25	5,75
0,250	649,2	65,33	28,93	71,07
0,125	91,1	9,17	19,76	80,24
0,063	191,7	19,29	0,47	99,53
Refugos	4,7	0,47		
Totais	993,8	100,00		
Módulo de Finura				1,58
Variação da massa [%]				0,92



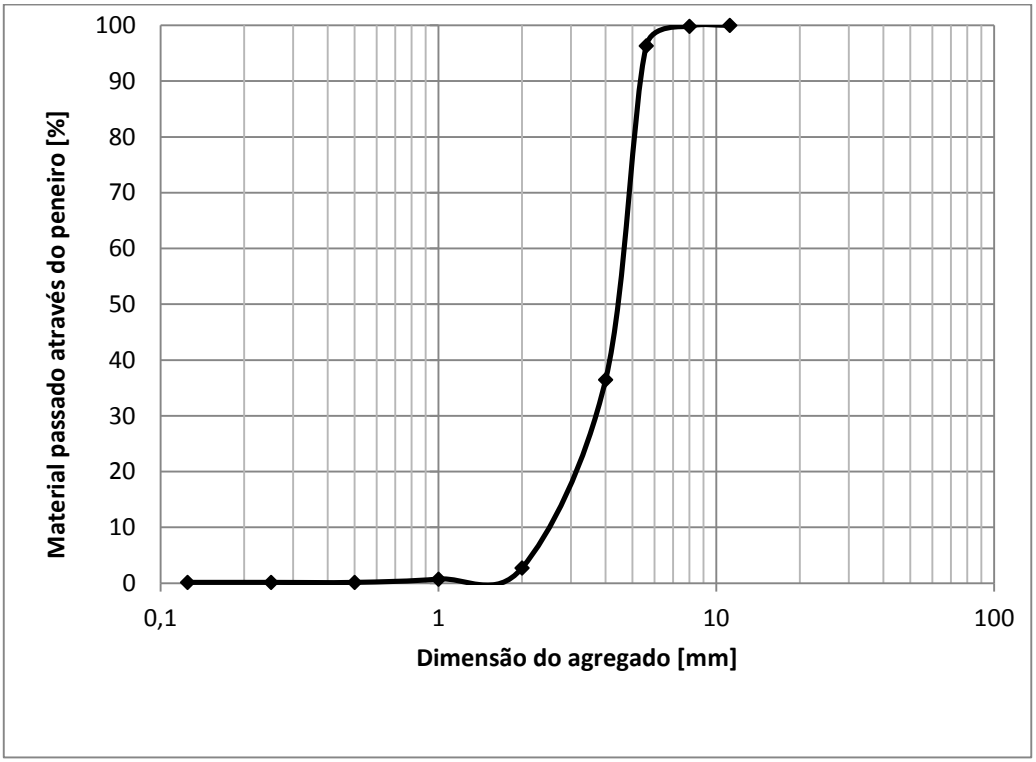
Areia grossa

Material: **AREIA GROSSA**				
Massa da amostra [g]				**1007,4**
Peneiro (mm)	**Resíduo (Retido)**		**Resíduo acumulado**	
			Passado	**Retido**
	[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
8,0	0,0	0,00	100,00	0,00
5,6	8,5	0,85	99,15	0,85
4,0	14,5	1,45	97,70	2,30
2,0	95,5	9,55	88,15	11,85
1,0	304,6	30,45	57,70	42,30
0,5	420,9	42,08	15,62	84,38
0,250	111,8	11,18	4,44	95,56
0,125	19,9	1,99	2,45	97,55
0,063	24,4	2,44	0,01	99,99
Refugos	0,1	0,01		
Totais	1000,2	100,00		
Módulo de Finura				3,34
Variação da massa [%]				0,71



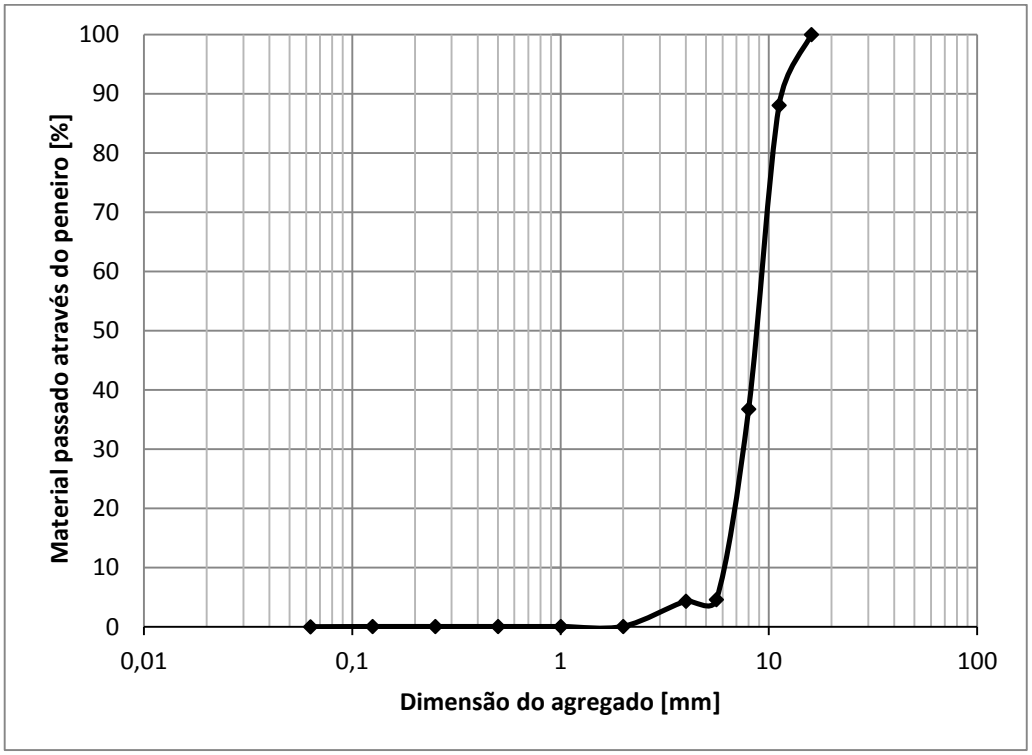
Bago de arroz

Material: **BAGO DE ARROZ**				
Massa da amostra [g]				**1008,4**
Peneiro (mm)	**Resíduo (Retido)**		**Resíduo acumulado**	
			Passado	**Retido**
	[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
16,0			100,00	0
11,2	0	0,00	100,00	0,00
8,0	1,6	0,16	99,84	0,16
5,6	35,3	3,53	96,31	3,69
4,0	598,7	59,82	36,49	63,51
2,0	338,0	33,77	2,72	97,28
1,0	19,8	1,98	0,74	99,26
0,5	6,0	0,60	0,14	99,86
0,250	0	0,00	0,14	99,86
0,125	0	0,00	0,14	99,86
0,063	0	0,00		
Refugos	1,4	0,14		
Totais	1000,8	100,00		
Módulo de finura				5,60
Variação da massa [%]				0,75



Brita 1

Material: **BRITA 1**				
Massa da amostra [g]				**1005,4**
Peneiro (mm)	**Resíduo (Retido)**		**Resíduo acumulado**	
			Passado	**Retido**
	[g]	**[%]**	**[%]**	**[%]**
16,0	0	0	100,00	0
11,2	120,2	11,96	88,04	11,96
8,0	515,9	51,31	36,73	63,27
5,6	323,4	32,17	4,57	95,43
4,0	2,5	0,25	4,32	95,68
2,0	42,8	4,26	0,06	99,94
1,0	0,3	0,03	0,03	99,97
0,5	0	0,00	0,03	99,97
0,250	0	0,00	0,03	99,97
0,125	0	0,00	0,03	99,97
0,063	0	0,00		
Refugos	0,3	0,03		
Totais	1005,4	100,00		
Módulo de finura				6,59
Variação da massa [%]				0,00



ANEXO B – COMPOSIÇÃO DOS BETÕES

Volume a produzir por tipo betão

	Nome	a/c	Compressão 15x15x15		Compressão Diametral	Módulo de Elasticidade	Cubo a= 10 cm	Volume por tipo de betão (dm^3)	Volume + 15% de desperdício (dm^3)
			7 dias	28 dias					
Betão Leve	BL 1	0,60	3	8	3		1	54,03	62,13
	BL 2	0,45	3	8	3	2	1	64,63	74,33
	BL 3	0,35	3	8	3		1	54,03	62,13
	BL 4	0,35	3	8	3		1	54,03	62,13
Betão Normal	BN 1	0,60	3	8	3		1	54,03	62,13
	BN 2	0,45	3	8	3	2	1	64,63	74,33
	BN 3	0,35	3	8	3		1	54,03	62,13
Volume Unitário (dm^3)			3,38	3,38	5,30	5,30	1,00		
								Volume total (dm^3)	**459,32**

Notas:

$V_{betão}$ = 1,15 x V — *Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade*

(15% de desperdício) — Cilindro 15 x 30 (cm)

Volume dos constituintes por m^3 de betão

a/c	0,45	0,35/0,60
$V_{betão}$ (l)	76	64
$V_{betão}$ (m^3)	0,076	0,064

a/c	Agregado grosso (l/m^3)	Cimento (kg/m^3)	$V_{(areia\ total)}$	$V_{(areia\ total)}$ (l/m^3)	$V_{(areia\ grossa)}$ (l/m^3)	$V_{(areia\ fina)}$ (l/m^3)	$V_{(água)}$ (l/m^3)
0,60	350	350	0,297	297,10	198,06	99,03	210,00
0,45	350	400	0,31	310,97	207,31	103,66	180,00
0,35	350	450	0,32	317,34	211,56	105,78	157,50

Dados:

ρ_c= 3100 kg/m^3 — V_{ar}=30 litros

Massa Cimento (kg)	192
Massa Total Cimento + 30% (kg)	**249,6**

$V_{(areia\ Total)} = 1 - (V_{(agregado\ grosso)} + V_{(cimento)} + V_{ar} + V_{(água)})$

$V_{(cimento)} = M/\rho$

$V_{(água)} = a/c * M_{(cimento)}$

$V_{(areia\ grossa)} = 2/3\ V_{(areia\ total)}$

$V_{(areia\ fina)} = 1/3\ V_{(areia\ total)}$

Betão de referência

$$\%\ R_{Bago}x + \%R_{Brita}(1 - x)$$

		x	0,300
Peneiros (mm)	**Leca**	**Brita Composta**	Δ^2
16,0	100,0	100,00	0,00
11,2	94,1	91,63	6,21
8,0	66,2	55,66	111,24
5,6	29,8	32,09	5,11
4,0	3,0	13,97	120,69
2,0	0,1	0,86	0,50
1,0	0,1	0,24	0,03
0,5	0,1	0,06	0,00
		$\Sigma\Delta^2$	**243,79**
Módulo de Finura			6,29

A brita composta é definida por 30% de bago de arroz e 70% de brita 1.

Formulação da massa (kg) dos agregados por m³ de betão (sem correção)

	a/c	$M_{(brita)}$	$M_{(bago)}$	$M_{(areia\ 1)}$	$M_{(areia\ 2)}$	$M_{(cimento)}$	$M_{(água)}$	SP (%)
BN 1	0,6	660	277	516	258	350	210	-
BN 2	0,45	660	277	541	270	400	180	0,2
BN 3	0,35	659	277	549	275	450	157,5	0,5
	a/c	$M_{(Leca)}$	$M_{(bago)}$	$M_{(areia\ 1)}$	$M_{(areia\ 2)}$	$M_{(cimento)}$	$M_{(água)}$	SP (%)
BL 1	0,6	375	-	516	258	350	210	-
BL 2	0,45	375	-	541	270	400	180	0,1
BL 3	0,35	374	-	549	275	450	157,5	0,5
	a/c	$M_{(Leca)}$	$M_{(bago)}$	$M_{(areia\ Leca)}$	$M_{(areia\ 2)}$	$M_{(cimento)}$	$M_{(água)}$	SP (%)
BL 4	0,35	374	-	216	275	450	157,5	0,5

Notas:

Areia 1 - Areia grossa
Areia 2 - Areia fina
SP - Superplastificante

Formulação da massa (kg) dos agregados por betonagem (com correção)

a/c	0,45	0,35/0,60
$V_{(betão)}$ (l)	74,3	62,1
$V_{(betão)}$ (m^3)	0,0743	0,0621

	Massa (kg)							Massa (g)
	a/c	$M_{(brita)}$	$M_{(bago)}$	$M_{(areia\ 1)}$	$M_{(areia\ 2)}$	$M_{(cimento)}$	$M_{(água)}$	SP (g)
BN 1	0,6	41,213	17,297	32,061	16,030	21,747	13,223	-
BN 2	0,45	49,301	20,692	40,211	20,068	29,731	13,588	59,5
BN 3	0,35	41,951	17,297	34,111	17,087	27,960	9,961	139,8
	a/c	$M_{(Leca)}$	$M_{(bago)}$	$M_{(areia\ 1)}$	$M_{(areia\ 2)}$	$M_{(cimento)}$	$M_{(água)}$	SP (g)
BL 1	0,6	23,337	-	32,061	16,030	21,747	14,912	-
BL 2	0,45	27,917	-	40,211	20,068	29,731	15,609	29,7
BL 3	0,35	23,275	-	34,111	17,087	27,960	11,645	139,8
	a/c	$M_{(Leca)}$	$M_{(bago)}$	$M_{(areia\ Leca)}$	$M_{(areia\ 2)}$	$M_{(cimento)}$	$M_{(água)}$	SP (g)
BL 4	0,35	23,275	-	13,437	17,087	27,960	12,987	139,8

ANEXO C – MASSA VOLÚMICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E TEOR DE HUMIDADE

Massas volúmicas e absorção de água

	M_1	M_2	M_3	M_4	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	$W_{abs,24}$
Areia leve	469,2	1637,0	1662,5	427,8	944	865	948	9,68
Leca HD	318,8	1743,0	1676,0	292,3	1297	1161	1266	9,07
Areia fina	519,5	1995,3	1676,0	518,5	2603	2590	2595	0,19
Areia grossa	607,2	2053,2	1676,0	601,2	2684	2614	2640	1,00
Bago de arroz	824,6	2191,3	1676,0	820,1	2691	2651	2666	0,55
Brita 1	1015,9	2313,1	1676,0	1012,1	2699	2672	2682	0,38

ρ_a – Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm^3);

ρ_{rd} – Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm^3);

ρ_{ssd} – Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm^3);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura registada na pesagem de M_2 (kg/dm^3);

$W_{abs,24}$– Absorção de água após imersão em água durante 24 h (%);

M_1 – Massa do provete saturado com superfície seca (g);

M_2 – Massa do conjunto água+provete+balão (g);

M_3 – Massa do picnómetro cheio de água (g);

M_4 – Massa da amostra de ensaio após secagem em estufa (g).

Teor de humidade

	M_1	M_2	TH (%)
Areia leve	1038,7	1040,4	0,16
Leca HD	402,6	403,3	0,17
Areia fina	518,5	518,9	0,08
Areia grossa	701,2	702,0	0,11
Bago de arroz	530,0	530,7	0,13
Brita 1	1257,9	1258,4	0,04

M_1 – Massa do agregado seco (após 24 horas em estufa);

M_2 – Massa do agregado em ambiente natural.

ANEXO D – MASSA VOLÚMICA NO ESTADO ENDURECIDO

Volume e Massa volúmica seca

	BN 1	BN 2	BN 3	BL 1	BL2	BL 3	BL 4
$Massa_{imersa}$ (g)	1396,5	1409,9	1447,1	784,3	831,5	909,2	525,8
$Massa_{sup.\ Seca}$ (g)	2384,6	2407,7	2443,5	1768,4	1828,4	1905,1	1521,5
$Massa_{seca}$ (g)	2237,2	2284,9	2338,9	1606,5	1704,4	1796,8	1402,5
Volume (dm^3)	0,99	0,1000	0,998397	0,986	0,999	0,998	0,998
MV_{seca} (Kg/m^3)	**2260**	**2285**	**2343**	**1629**	**1706**	**1801**	**1406**

ANEXO E – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão (7 dias de idade)

	Amostra	Massa (g)	Força (KN)	$f_{c\,7}$ (MPa)
BN 1	**1**	7878,8	781,8	34,7
	2	7946,7	802,3	35,7
	3	7956,7	806,3	35,8
BN 2	**1**	7965,3	1219	54,2
	2	8039,3	1209	53,7
	3	7965,2	1238	55,0
BN 3	**1**	8102,2	1492	66,3
	2	8048,5	1544	68,6
	3	8108,6	1463	65,0
BL 1	**1**	6190,8	605,8	26,9
	2	6193,9	615,7	27,4
	3	6172	618	27,5
BL 4	**1**	5113,2	686,3	30,5
	2	4941,9	701	31,2
	3	5045	683,9	30,4

Resistência à compressão (28 dias de idade)

	Amostra	Massa (g)	Força (KN)	$f_{c\,28}$ (MPa)
BN 1	**1**	8003,6	1009	44,8
	2	7941,8	987,5	43,9
	3	7869,2	1012	45,0
	4	7924,6	1053	46,8
	5	7947	1018	45,2
	6	7971,8	1061	47,2
	7	7866,3	1045	46,4
	8	7940,9	1045	46,4
BN 2	**1**	8018,2	1447	64,3
	2	7961,4	1392	61,9
	3	8039,6	1415	62,9
	4	7995,3	1464	65,1
	5	7925,1	1295	57,6
	6	7942,6	1413	62,8
	7	8064,9	1426	63,4
	8	7940,5	1411	62,7

	Amostra	Massa (g)	Força (KN)	$f_{c\,28}$ (MPa)
BN 3	**1**	8022,1	1711	76,0
	2	8094,7	1713	76,1
	3	8104,9	1600	71,1
	4	8116,4	1651	73,4
	5	8085,4	1771	78,7
	6	8102,3	1590	70,7
	7	8031,2	1794	79,7
	8	8088,7	1781	79,2
BL 1	**1**	6096,6	772,9	34,4
	2	6159,7	822,9	36,6
	3	6152,6	739,8	32,9
	4	6086,4	734,3	32,6
	5	6092,4	754,2	33,5
	6	6158,2	759,2	33,7
	7	6168,2	767,7	34,1
	8	6131,2	790,1	35,1
BL 2	**1**	6160,4	916,1	40,7
	2	6188,2	914,1	40,6
	3	6107,9	904,9	40,2
	4	6162,4	891,7	39,6
	5	6141,8	878	39,0
	6	6171,4	877,5	39,0
	7	6207,9	904,7	40,2
	8	6167,1	879,6	39,1
BL 3	**1**	6301,8	1105	49,1
	2	6361,8	1128	50,1
	3	6293,5	1138	50,6
	4	6358,8	1153	51,2
	5	6282,3	1114	49,5
	6	6297	1110	49,3
	7	6280,2	1070	47,6
	8	6291	1157	51,4
BL 4	**1**	4960,5	768,6	34,2
	2	5172	753,3	33,5
	3	5022,6	736,9	32,8
	4	5159,7	811,3	36,1
	5	5114,1	815,5	36,2
	6	5054,1	829	36,8
	7	5135,9	760,5	33,8
	8	5060,2	785,4	34,9

ANEXO F – RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Resistência à tracção (28 dias de idade)

	Amostra	Massa (g)	Força (KN)	$f_{ct\,28}$ (MPa)
BN 1	**1**	12659,4	240,2	3,40
	2	12645,4	239,4	3,39
	3	12540,4	248,4	3,51
BN 2	**1**	12821,2	320,6	4,54
	2	12802,8	384,7	5,44
	3	12803,4	312,4	4,42
BN 3	**1**	12756,9	446,2	6,31
	2	12983,1	406,8	5,76
	3	12813,7	391,4	5,54
BL 1	**1**	9804,4	160,7	2,27
	2	9765,5	152,9	2,16
	3	9811,1	156,1	2,21
BL 2	**1**	9839,5	195,1	2,76
	2	9890,7	254,5	3,60
	3	9778,8	188,1	2,66
BL 3	**1**	10156,2	309,7	4,38
	2	10171,9	263,2	3,72
	3	10173	262,4	3,71
BL 4	**1**	7948,8	173,2	2,45
	2	7996,5	172,6	2,44
	3	8016,7	194	2,74

ANEXO G – MÓDULO DE ELASTICIDADE

Módulo de Elasticidade (28 dias de idade)

		Carga (KPa)	ν	$E_{c\,28}$ (GPa)
BN 2	**1º Ensaio**	250	0,22	43,064
				43,489
				43,638
				43,585
	2º Ensaio	250	0,22	41,622
				41,962
				41,864
				41,864
BL 2	**1º Ensaio**	248,3	0,46	20,181
				20,566
				20,483
				20,566
	2º Ensaio	246	0,34	20,406
				20,716
				20,668
				20,728

ANEXO H – PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS BETÕES NO ESTADO ENDURECIDO

Provetes em equilíbrio com a humidade relativa ambiente

	λ (w/mk)	Cp x 10^6 (J/m^3k)	a x 10^{-6} (m^2/s)	T_{mean} (°C)	ΔT (K)
BN 1	2,5889	1,5911	1,5395	20,742	9,8379
	2,6065	1,6119	1,5359	20,978	9,7333
BN 2	2,57	1,6717	1,5395	21,438	9,7907
	2,5801	1,6491	1,5645	21,299	9,7795
BN 3	2,3936	1,706	1,4031	21,234	9,8929
	2,4284	1,7376	1,3975	21,332	9,7763
BL 1	1,4313	1,8008	0,7948	21,179	9,6295
	1,4124	1,7981	0,808	21,175	9,6021
BL 2	1,5362	1,844	0,8331	21,297	9,64
	1,566	1,8163	0,8622	21,427	9,6713
BL 3	1,6462	1,9684	0,9005	21,264	9,6366
	1,6226	1,8499	0,8771	21,433	9,7063
BL 4	0,7627	1,6533	0,4613	21,317	9,5792
	0,7587	1,6421	0,4601	21,3	9,4587

Provetes saturados

	λ (w/mk)	Cp x 10^6 (J/m^3k)	a x 10^{-6} (m^2/s)	T_{mean} (°C)	ΔT (K)
BN 1	2,6379	1,7593	1,4669	21,193	9,48513
	2,7052	1,9582	1,3815	21,493	9,8513
BN 2	2,6346	1,9521	1,3289	21,142	9,7052
	2,6726	1,9959	1,334	21,483	9,7157
BN 3	2,4552	1,7986	1,3651	21,291	9,7872
	2,471	1,814	1,5321	21,123	9,8009
BL 1	1,4883	1,8418	0,8081	21,561	9,6141
	1,4817	1,7635	0,7972	21,115	9,6503
BL 2	1,6579	1,8858	0,8791	21,743	9,6572
	1,5798	1,8361	0,8604	21,956	9,6001
BL 3	1,679	1,7929	0,9524	21,801	9,7319
	1,6405	1,9267	0,8515	21,895	9,5528
BL 4	0,7669	1,7384	0,4296	21,559	9,3559
	0,7801	1,7847	0,4298	21,561	9,6362

Provetes secos

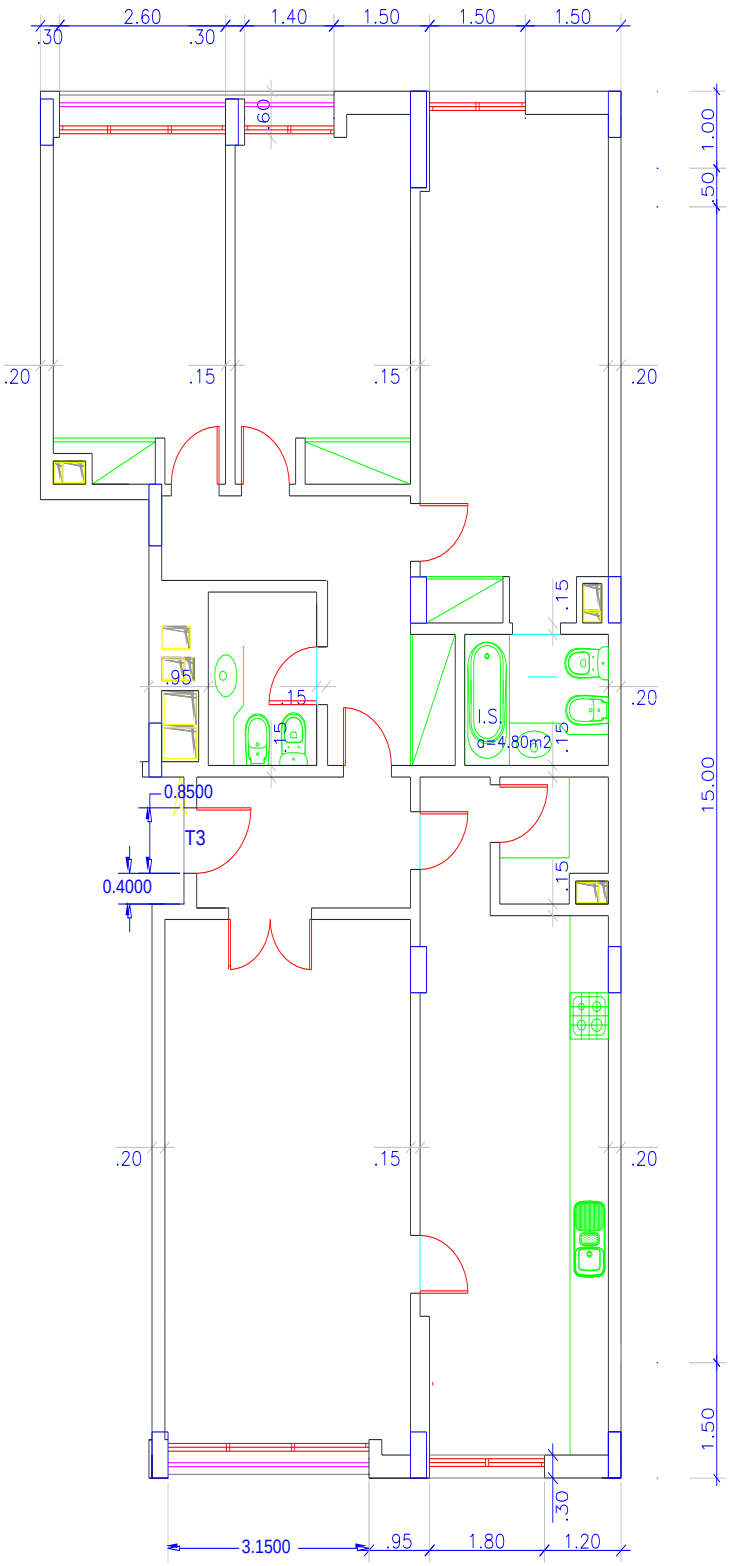
	λ (w/mk)	Cp x 10^6 (J/m^3k)	a x 10^{-6} (m^2/s)	T_{mean} (°C)	ΔT (K)
BN 1	2,1954	1,715	1,2801	19,353	9,8054
	2,2033	1,8357	1,2003	19,616	9,7561
BN 2	2,1544	1,8936	1,1377	19,491	9,7832
	2,1658	1,929	1,1227	19,762	9,6814
BN 3	1,9679	1,7556	1,064	19,521	9,6897
	1,981	1,7433	1,1364	19,757	9,7076
BL 1	0,9672	1,6122	0,5813	19,852	9,5882
	1,013	1,6622	0,6094	20,113	9,6007
BL 2	1,1826	1,7098	0,6917	20,031	9,6288
	1,2007	1,7204	0,6979	20,344	9,6875
BL 3	1,3328	1,6795	0,7936	20,208	9,7564
	1,3459	1,6609	0,8104	20,428	9,6378
BL 4	0,525	1,5583	0,3369	20,225	9,4421
	0,558	1,5795	0,355	20,359	9,4653

Variação percentual do coficiente condutibilidade térmica por cada variação de 1% no teor em água

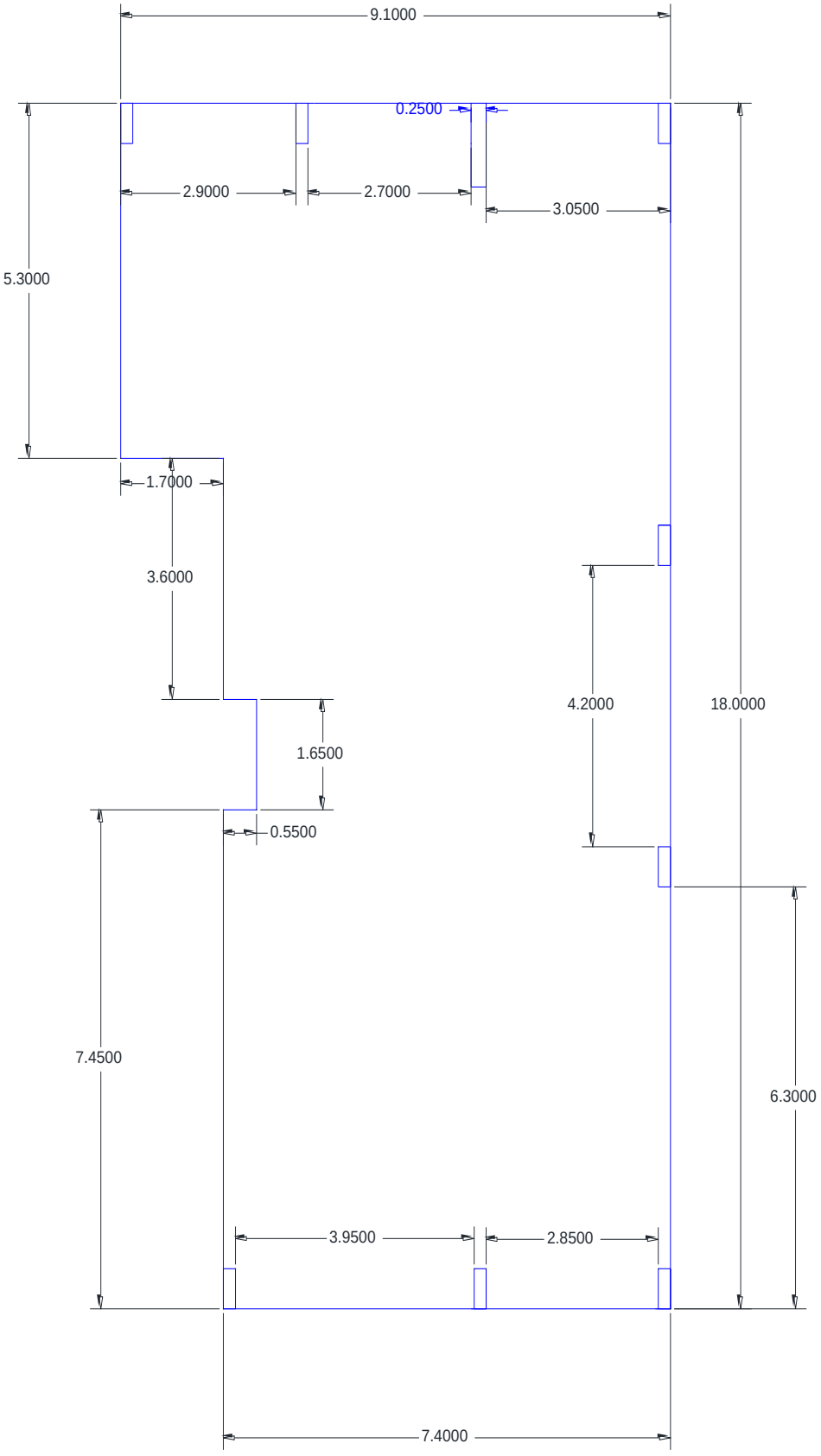
	Variação	Média
BN 1	5,49	**4,3**
BN 2	4,13	
BN 3	3,32	
BL 1	4,97	**4,6**
BL 2	4,81	
BL 3	3,87	
BL 4	5,12	**5,1**

ANEXO I – PLANTA DO APARTAMENTO

Planta 1



Planta 2


9.1000
0.2500
2.9000
2.7000
3.0500
5.3000
1.7000
3.6000
4.2000
18.0000
1.6500
0.5500
7.4500
6.3000
3.9500
2.8500
7.4000